# পরমাণু ও কেন্দ্রক গঠন পরিচয়

[ An Introduction to Atomic & Nuclear Physics ]

ডঃ সমরেন্দ্রনাথ ঘোষাল

১৩৬০

# ভূমিকা

ভারত সরকার কর্তৃক প্রবর্তিত বিভিন্ন ভারতীয় ভাষায় সাম্মানিক স্তরের উপযোগী পুস্তক রচনার প্রকল্প অনুযায়ী বর্তমান গ্রন্থখানি লেখা হয়েছে। বাংলা ভাষায় বিজ্ঞান বিষয়ক বই লেখার কাজ ইতিপূর্বে কেবল বিদ্যালয় পাঠ্য পুস্তক স্তরেই সীমাবদ্ধ ছিল। উচ্চশিক্ষার ক্ষেত্রে বিজ্ঞান বিষয়ে প্রামাণ্য পাঠ্য পুস্তক রচনার সুপরিকল্পিত প্রয়াস এই সর্ব প্রথম শুরু হয়েছে। এরই ফলে বঙ্কিমচন্দ্র, রামেন্দ্রসুন্দর, রবীন্দ্রনাথ প্রমুখ পথিকৃৎ মনীষিগণের প্রারম্ভিক প্রয়াস অবশেষে সার্থক রূপায়ণের সুযোগ লাভ করেছে।

গত পঁচিশ বছর ধরে সাম্মানিক এবং সম্মানোত্তর শ্রেণীর ছাত্রছাত্রীগণকে পরমাণু এবং কেন্দ্রক বিজ্ঞান বিষয়ে পড়াবার জন্য আমাকে যে সব অনুলিপি প্রস্তুত করতে হয়েছিল তা থেকেই বর্তমান গ্রন্থখানির উদ্ভব হয়েছে। প্রধানতঃ পশ্চিম বঙ্গের বিভিন্ন বিশ্ববিদ্যালয়ের সাম্মানিক পদার্থবিদ্যা বিষয়ক পাঠক্রম অনুযায়ী গ্রন্থখানি রচিত হয়েছে। এটিকে স্বয়ং সম্পূর্ণ করার জন্য এবং বিভিন্ন বিষয়গুলির প্রাঞ্জল ব্যাখ্যার জন্য সযত্ন প্রয়াসী হয়েছি। গ্রন্থখানি ছাত্রছাত্রী-গণের প্রয়োজন মেটাতে পারলে আমার প্রয়াস সার্থক বলে মনে করব।

আমার বহু প্রাক্তন সহকর্মী, ছাত্রছাত্রী এবং নানা শিক্ষা প্রতিষ্ঠানের সংগে সংযুক্ত অনেক অধ্যাপক ও গবেষক নানাভাবে এই পুস্তক রচনার ব্যাপারে আমাকে উৎসাহিত ও সাহায্য করেছেন। তাঁদের সকলের ঋণ আমি কৃতজ্ঞ চিত্তে স্মরণ করি। এই প্রসঙ্গে সকলের নাম উল্লেখ করা সম্ভব না হলেও যাঁদের কথা বলা একান্ত আবশ্যক তাঁরা হলেন সর্বশ্রী রাজেন্দ্রলাল সেনগুপ্ত, বিজয়শংকর বসাক, অমলকুমার রায়চৌধুরী, শ্যামল সেনগুপ্ত, রাসবিহারী চক্রবর্তী, প্রতীপকুমার চৌধুরী, দেবীপ্রসাদ সরকার, ধীরেন্দ্রনাথ কুণ্ডু, ভাস্কর বালিগা, সূর্যেন্দুবিকাশ কর মহাপাত্র, দিলীপকুমার ঘোষ, সুধাংশুশেখর দেব এবং তারাশংকর ভট্টাচার্য। তাছাড়া ভাষা এবং পরিভাষার বিষয়ে নানাভাবে সাহায্য করে আমাকে কৃতজ্ঞতাপাশে আবদ্ধ করেছেন শ্রদ্ধেয় অধ্যাপক সুকুমার সেন এবং ডঃ সত্যেন্দ্রনাথ ঘোষাল। পাণ্ডুলিপি প্রস্তুতি ও প্রুফ সংশোধনের কাজে বিশেষভাবে সাহায্য করেছেন শ্রীমতী শুভা ঘোষাল এবং শ্রীশ্বেতকেতু ঘোষাল।

বইখানি লেখার কাজ প্রায় চার বছর আগে শেষ হয়েছিল। কিন্তু মুদ্রণ বিভ্রাটের জন্য প্রকাশনে অনেক দেরী হয়ে গেল। একই কারণে 'পরমাণু বিজ্ঞান' ও 'কেন্দ্রক বিজ্ঞান' বিভাগ দুটিকে স্বতন্ত্র খণ্ড হিসাবে পুস্তকের অন্তর্ভুক্ত করতে হয়েছে। অবশ্য সেজন্য বইটির যাতে কোনরূপ অঙ্গহানি না হয় সেদিকে সতর্ক দৃষ্টি রাখা হয়েছে।

পশ্চিম বঙ্গ রাজ্য পুস্তক পর্ষদের মুখ্য প্রশাসন আধিকারিক শ্রীঅবনী মিত্র বইটি প্রকাশনের কাজে যেভাবে সর্বস্তরে সহযোগিতা করেছেন তার জন্য আমি তাঁর কাছে সর্বতোভাবে ঋণী। তাছাড়া রাজ্য পুস্তক পর্ষদের অন্যান্য কর্মিবৃন্দকে তাঁদের অকুণ্ঠ সহযোগিতার জন্য আমার আন্তরিক ধন্যবাদ জানাই। পরিশেষে বিশেষভাবে ধন্যবাদ জানাই মেসার্স কে. পি. বসু প্রিন্টিং ওয়ার্কসের কর্মিবৃন্দকে, বিশেষতঃ শ্রীসত্যপ্রিয় ঘোষকে, তাঁদের ধৈর্য, সহানুভূতি এবং আন্তরিকতাপূর্ণ সহযোগিতার জন্য।

সমরেন্দ্রনাথ ঘোষাল

# সূচীপত্র

## প্রথম খণ্ড



## দ্বিতীয় খণ্ড

# পরমাণু ও কেন্দ্রক গঠন পরিচয়

[ প্রথম খণ্ড ]

# পরিচ্ছেদ 1

# গ্যাসের তড়িৎ পরিবাহিতা

## 1. 1: সূচনা

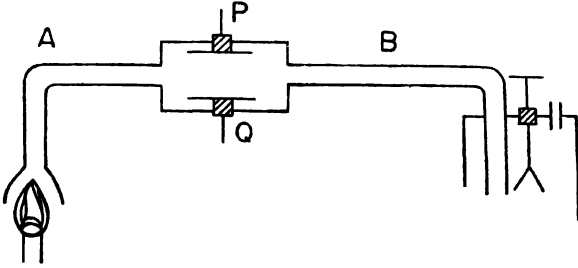
আমরা জানি যে বিভিন্ন পদার্থের তড়িৎ পরিবাহিতা বিভিন্ন। সাধারণতঃ ধাতুগুলি তড়িতের সুপরিবাহী। গ্যাসের পরিবাহিতা অনার্দ্র অবস্থায় খুবই কম। এই অবস্থায় গ্যাসকে প্রায় সম্পূর্ণ অন্তরক পদার্থ (Insulator) বলে মনে করা যেতে পারে। কিন্তু কোন কোন ক্ষেত্রে গ্যাসের মধ্য দিয়েও তড়িৎ প্রবাহ দেখা যায়। বিদ্যুৎ চমকানর সময় বা বজ্রপাতের সময় বাতাসের মধ্য দিয়ে ক্ষণস্থায়ী প্রবল তড়িৎ প্রবাহের সৃষ্টি হয়। পরীক্ষাগারে আবেশ কুণ্ডলী (Induction Coil) চালাবার সময়ে এর ধাতব দণ্ড দুটির মধ্যে যে তড়িৎ স্ফুলিঙ্গের (Spark) সৃষ্টি হয় তাও আসলে বাতাসের মধ্য দিয়ে ক্ষণস্থায়ী তড়িৎ প্রবাহের নিদর্শন। বিজ্ঞাপনের জন্য ব্যবহৃত নীয়ন বাতি বা গৃহে ব্যবহৃত প্রতিপ্রভ বাতি (Fluorescent Lamp) প্রভৃতির মধ্যে যে তড়িৎ প্রবাহ হয় তাও গ্যাস বা বাষ্পের মধ্য দিয়ে হয়। গ্যাসের মধ্যে তড়িৎ প্রবাহের ক্রিয়াবিধি অবশ্য কঠিন বা তরলের মধ্যে তড়িৎ প্রবাহের ক্রিয়াবিধি থেকে সম্পূর্ণ ভিন্ন। পরে দেখা যাবে যে ধাতব পদার্থের মধ্যে তড়িৎ প্রবাহ হয় ইলেকট্রন নামক এক প্রকার ঋণাত্মক আহিত কণিকার গতির জন্য। ধাতব পদার্থে এরা মুক্ত অবস্থায় ইতস্ততঃ বিচরণ করে এবং সামান্য মাত্র বিভব-প্রভেদ প্রয়োগ করলেই ধাতুর এক প্রান্ত থেকে অন্য প্রান্তে চলে যায়। বিভব প্রভেদের সংগে তড়িৎ প্রবাহের পরিবর্তন ওহ্মের সূত্রানুযায়ী হয়ে থাকে। আবার দ্রবণ জাতীয় তরলের মধ্য দিয়ে যে তড়িৎ প্রবাহ হয় তার কারণ তড়িৎ বিশ্লেষণ (Electrolytic Dissociation)। দ্রবণের মধ্যে দ্রাব্য পদার্থ (Solute) ধনাত্মক ও ঋণাত্মক আধান সম্পন্ন দুই প্রকার কণিকায় (আয়নে) বিভাজিত হয়ে যায় এবং বিভব প্রভেদ প্রয়োগের ফলে এরা বিপরীত দিকে গতি সম্পন্ন হয়ে তড়িৎ প্রবাহের সৃষ্টি করে। এই দুই ক্ষেত্রে তড়িৎ প্রবাহ উষ্ণতার উপর কিছুটা নির্ভর করে, কিন্তু চাপ পরিবর্তনে প্রবাহ বিশেষ পরিবর্তিত হয় না। গ্যাসের মধ্যে তড়িৎ প্রবাহের জন্য প্রথমতঃ উপরের দুই ক্ষেত্র অপেক্ষা অনেক উচ্চতর বিভব প্রভেদের প্রয়োজন হয়। দ্বিতীয়তঃ প্রবাহ মাত্রা চাপের উপর বিশেষ ভাবে

নির্ভরশীল। বর্তমান পরিচ্ছেদে গ্যাসের তড়িৎ পরিবাহিতা সম্বন্ধে বিশদভাবে আলোচনা করা হবে।

## 1. 2: গ্যাসের অভ্যন্তরে তড়িৎ পরিবহণ

আগেই বলা হয়েছে যে স্বাভাবিক অবস্থায় অনার্দ্র গ্যাস তড়িতের কুপরিবাহী। কিন্তু যদি সম্পূর্ণ অন্তরিত (Insulated) একটি আহিত স্বর্ণপত্র তড়িৎবীক্ষণ যন্ত্র (Electroscope) দীর্ঘ সময় ধরে ফেলে রাখা যায় তাহলে তার স্বর্ণপত্র দুটি ধীরে ধীরে নিমীলিত হয়ে যেতে দেখা যাবে। এর থেকে বোঝা যায় যে তড়িৎবীক্ষণের ভিতরের বাতাসের মধ্য দিয়েই পত্র দুটির আধানের ক্ষরণ ঘটে। ১৯০০ সালের কাছাকাছি এই জাতীয় বিশেষ কতকগুলি পরীক্ষার সাহায্যে বৃটিশ বিজ্ঞানী উইলসন (C.T.R. Wilson) গ্যাসের এই তড়িৎ পরিবহণ ধর্ম সংশয়াতীত ভাবে প্রমাণ করেন।

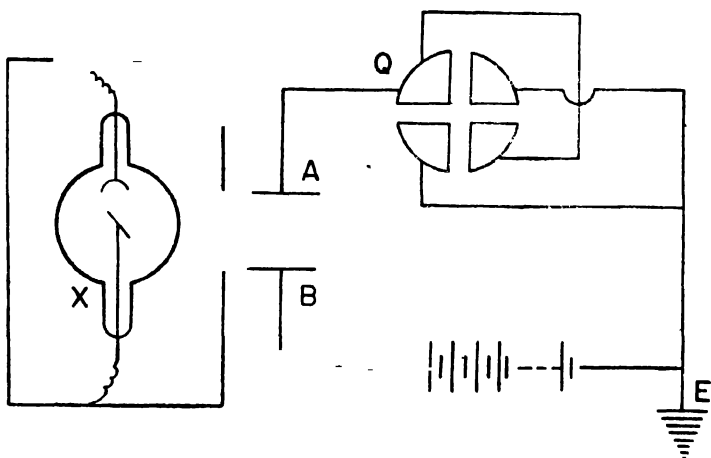
তড়িৎবীক্ষণের আধানের উপরোক্ত ক্ষরণ খুব ধীরে ধীরে হয়। কিন্তু বিশেষ ধরনের বহিস্থ কারকের (Agent) সাহায্যে এই ক্ষরণকে আরও ত্বরান্বিত করা সম্ভব। যেমন X-রশ্মি বা অতি-বেগনী (Ultra Violet) রশ্মি যদি যন্ত্রটির মধ্যের বাতাসের ভিতর দিয়ে পাঠান যায়, তাহলে পত্র দুটির নিমীলন খুব তাড়াতাড়ি হয়। অর্থাৎ এই সব রশ্মি বাতাসের পরিবাহিতা বহুগুণে বাড়িয়ে দেয়। আবার তেজস্ক্রিয় (Radio-active) পদার্থ থেকে নির্গত আলফা, বীটা বা গামা রশ্মিও বাতাসের পরিবাহিতাকে এইভাবে বাড়িয়ে দেয়। আরও দেখা যায় যে জ্বলন্ত শিখার উপরকার গ্যাস যদি কোন উপায়ে টেনে নিয়ে তড়িৎবীক্ষণ যন্ত্রের মধ্য দিয়ে পাঠান যায়, তাহলে যন্ত্রটির ভিতরের বাতাসের পরিবাহিতা অনেক বেড়ে যায়। বহিস্থ কারকের ক্রিয়া যদি বন্ধ করা হয়, তাহলে অল্পক্ষণ পরেই পরিবাহিতা আবার কমে যায়, এবং বাতাস পূর্বের মত অন্তরক পদার্থে পরিণত হয়।

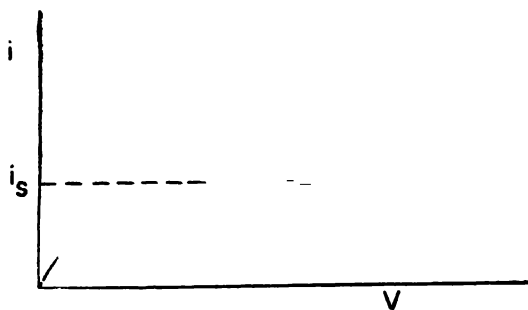
বাতাসের এই পরিবাহিতা বৃদ্ধির কারণ নিম্নে বর্ণিত পরীক্ষা দ্বারা বোঝা সম্ভব। (1.1) চিত্রে AB নলের মধ্যে P ও Q দুটি সমান্তরাল সমতল ধাতব তড়িৎদ্বার (Electrodes)। এদের মধ্যে উচ্চ বিভব প্রভেদ প্রয়োগ করা হয়। শিখার উপরকার পরিবাহী গ্যাস যদি এই তড়িৎদ্বার দুটির মধ্য দিয়ে পাঠান হয় তাহলে দেখা যায় এই গ্যাসের পরিবাহিতা বহুলাংশে কমে যায়। এর থেকে বোঝা যায় যে গ্যাসের পরিবাহিতার জন্য দায়ী গ্যাসের মধ্যে বর্তমান কোন প্রকার তড়িতাহিত কণিকা।

চিত্র 1.1
বহিস্থ কারকের ক্রিয়ায় গ্যাসের পরিবাহিতা বৃদ্ধির কারণ নির্ণয়ের জন্য পরীক্ষা ব্যবস্থা।

নলের মধ্য দিয়ে গ্যাস প্রবাহিত হবার সময় উক্ত কণিকাগুলি বিপরীত তড়িৎদ্বার কর্তৃক আকৃষ্ট হয়ে গ্যাস থেকে বিদূরিত হয়। ফলে গ্যাসের পরিবাহিতা বিলুপ্ত হয়। অনুরূপে যদি উক্ত পরিবাহী গ্যাসকে একটি তুলার প্লাগের মধ্য দিয়ে পাঠান হয় বা জলের মধ্য দিয়ে বুদবুদ আকারে পাঠান হয় তাহলে গ্যাসের পরিবাহিতা লোপ পায়। এই সমস্ত পরীক্ষা থেকে প্রমাণিত হয় যে গ্যাসের মধ্যে যখন তড়িতাহিত কণিকা বর্তমান থাকে তখনই গ্যাস পরিবাহী হয়। পরীক্ষার দ্বারা দেখা যায় যে, ধনাত্মক ও ঋণাত্মক, দুই প্রকার তড়িতাহিত কণিকাই পরিবাহী গ্যাসের মধ্যে বর্তমান থাকে। এই কণিকাগুলিকে 'আয়ন' (Ion) বলা হয়। গ্যাসের মধ্যে যখন পরিবাহিতা সৃষ্টি করা হয়, তখন বলা হয় যে গ্যাসটিকে 'আয়নিত' (Ionize) করা হয়েছে।

## 1. 3: আয়নন জনিত তড়িৎ প্রবাহ

গ্যাসের মধ্যে আয়ন উৎপন্ন হওয়ার ফলে যে তড়িৎ প্রবাহের সৃষ্টি হয়, তা নিম্নে বর্ণিত পরীক্ষার সাহায্যে নিরীক্ষণ করা সম্ভব।

(1.2) চিত্রে A ও B দুটি তড়িৎদ্বার। এদের মধ্যে খুব নিম্নমান বিভব প্রভেদ প্রয়োগ করা হয়। এখন যদি এদের অন্তর্বর্তী অঞ্চলের গ্যাসকে X-রশ্মির সাহায্যে পরিবাহী করা যায় তাহলে তড়িৎদ্বার দুটির মধ্যে তড়িৎ প্রবাহের সৃষ্টি হয়। প্রবাহ মাত্রা সাধারণতঃ খুব কম হয়। তবে Q বৃত্তপাদ ইলেকট্রোমিটার (Quadrant Electrometer) যন্ত্রের সাহায্যে সহজেই তা মাপা সম্ভব। এই তড়িৎ প্রবাহকে 'আয়নন প্রবাহ' (Ionization Current) বলা হয়। ধনাত্মক ও ঋণাত্মক আয়ন বিপরীত তড়িৎদ্বারে

চিত্র 1.2
বিভব প্রভেদ পরিবর্তনের সংগে গ্যাসের মধ্যে আয়নন প্রবাহ পরিবর্তন পরিমাপ পদ্ধতি

আকৃষ্ট হওয়ার ফলেই এই আয়নন প্রবাহের সৃষ্টি হয়। যদি বিভব প্রভেদ $V$ পরিবর্তন করা হয়, তাহলে আয়নন প্রবাহ $i$ পরিবর্তিত হয়। (1.3) চিত্রে এই পরিবর্তন লেখচিত্রের সাহায্যে দেখান হয়েছে। $V$ বৃদ্ধির সংগে

চিত্র 1.3
বিভব প্রভেদ এবং আয়নন প্রবাহের লেখচিত্র

$i$ প্রথম দিকে প্রায় একঘাতে (Linearly) বৃদ্ধি পায়: অর্থাৎ প্রায় ওহমের সূত্রানুযায়ী বাড়ে। কিন্তু পরে $V$ বৃদ্ধির সংগে $i$ অপেক্ষাকৃত ধীরে বৃদ্ধি পায় এবং অবশেষে ধ্রুবক হয়ে যায়। এই অবস্থায় একে বলা হয়

সম্পৃক্ত প্রবাহ (Saturation Current)। বিভব প্রভেদ যদি এর পর খুব বেশী বাড়ান হয়, তাহলে আয়নন প্রবাহ আবার হঠাৎ সম্পৃক্তমাত্রা $i_s$ থেকে খুব তাড়াতাড়ি বাড়তে আরম্ভ করে। প্রমাণ উষ্ণতা ও চাপে অনার্দ্র বাতাসে এই বৃদ্ধি শুরু হয় যদি তড়িৎদ্বার দুটির মধ্যে এক সেমি ব্যবধানে বিভবের মান ত্রিশ হাজার ভোল্ট অপেক্ষা বেশী হয়। সার্বিকভাবে দেখলে বলা যায় যে, বিভব-প্রভেদ পরিবর্তনের সঙ্গে আয়নন প্রবাহের পরিবর্তন ওহ্মের সূত্রানুযায়ী হয় না।

বিভব প্রভেদের সঙ্গে আয়নন প্রবাহের পরিবর্তন গাণিতিক পদ্ধতিতে নির্ণয় করতে হলে গ্যাসের মধ্যে আয়নগুলি কীভাবে বিচরণ করে তা বিবেচনা করা দরকার।

## 1. 4: আয়নের পুনর্সংযোজন

আপাতদৃষ্টিতে মনে হতে পারে যে, তড়িৎদ্বার দুটির মধ্যে যখন কোন বিভব প্রভেদ থাকে না, তখন বহিস্থ কারকের (যথা X-রশ্মির) ক্রিয়ার ফলে এদের মধ্যেকার গ্যাসে আয়নের সংখ্যা অনির্দিষ্টভাবে বেড়ে চলবে। কিন্তু প্রকৃতপক্ষে তা হয় না। উৎপন্ন আয়নের মোট সংখ্যা কিছুক্ষণ পরে ধ্রুবক হয়ে যায়। গতীয় তত্ত্ব (Kinetic Theory) অনুযায়ী গ্যাসের অভ্যন্তরস্থ ধনাত্মক ও ঋণাত্মক আয়নগুলি সর্বদা ইতস্ততঃ বিচরণ করে, যার ফলে তাদের পরস্পরের মধ্যে ক্রমাগত সংঘাত (Collision) ঘটে। তা ছাড়া তড়িৎশূন্য গ্যাস অণুগুলির সঙ্গেও তাদের ক্রমাগত সংঘাত ঘটে। এই সব সংঘাতের ফলে বিপরীত তড়িতাহিত দুটি আয়ন কখনও কখনও পরস্পরের সঙ্গে পুনর্সংযুক্ত হয়ে দুটি তড়িৎশূন্য পরমাণু বা অণুর সৃষ্টি করতে পারে। গ্যাসের মধ্যে দুই প্রকার আয়নের সংখ্যা বৃদ্ধির সঙ্গে এইরকম পুনর্সংযোজনের (Recombination) সংখ্যা ক্রমশঃ বৃদ্ধি পায়। অবশেষে এমন এক অবস্থা আসে যখন বহিস্থ কারকের ক্রিয়ার ফলে প্রতি সেকেন্ডে সৃষ্ট আয়ন-যুগলের (Ion Pair) সংখ্যা পুনর্সংযোজন হারের সমান হয়। এরপর আর আয়নের সংখ্যা বৃদ্ধি পায় না।

যদি কোন নির্দিষ্ট মুহূর্তে গ্যাসের মধ্যে একক আয়তনে বর্তমান আয়ন-যুগলের সংখ্যা $n$ হয়, তাহলে সময়ের সঙ্গে $n$ সংখ্যাটির পরিবর্তনের হার নির্ভর করে বহিস্থ কারকের ক্রিয়ার দ্বারা আয়ন উৎপত্তির হারের উপর। ধরা যাক যে প্রতি সেকেন্ডে একক আয়তন গ্যাসে $q$ সংখ্যক আয়ন-যুগল উৎপন্ন হয়। তা ছাড়া $n$-এর পরিবর্তনের হার নির্ভর করে বিপরীত আধান সম্পন্ন আয়ন-যুগলের পুনর্সংযোজনের হারের উপর। যেহেতু একক

আয়তনে উভয় প্রকার আয়নের সংখ্যাই $n$, অতএব যে কোন দুটি ঋণাত্মক এবং ধনাত্মক আয়নের মধ্যে সংঘাতের সম্ভাব্যতা (Probability) নির্ভর করে $n^2$ সংখ্যাটির উপর। অতএব লেখা যেতে পারে যে পুনর্সংযোজনের হার হচ্ছে $\alpha n^2$; এখানে $\alpha$ একটি ধ্রুবক। একে বলা হয় 'পুনর্সংযোজন গুণাঙ্ক' (Recombination Coefficient)। অতএব আমরা পাই

$$\frac{dn}{dt}=q-\alpha n^2 \tag{1.1}$$

(1.1) সমীকরণ থেকে পাওয়া যায়

$$\frac{dn}{n^2-q/\alpha}=-\alpha\, dt$$

অথবা $$\frac{dn}{n-\sqrt{\frac{q}{\alpha}}}-\frac{dn}{n+\sqrt{\frac{q}{\alpha}}}=-2\sqrt{\alpha q}.dt$$

এর থেকে সমাকলন করে পাওয়া যায়

$$\ln\frac{n-\sqrt{\frac{q}{\alpha}}}{n+\sqrt{\frac{q}{\alpha}}}=-2\sqrt{\alpha q}.t+\text{ধ্রুবক}$$

অথবা $$\frac{n-\sqrt{\frac{q}{\alpha}}}{n+\sqrt{\frac{q}{\alpha}}}=Ae^{-2\sqrt{q\alpha}.t}$$

$A$ হচ্ছে একটি ধ্রুবক। যদি অনুমান করা যায় যে $t=0$ সময়ে $n=0$ হয়, অর্থাৎ শুরুতে গ্যাসের মধ্যে কোন আয়ন থাকে না, তাহলে $A=-1$ পাওয়া যায়। অতএব আমরা পাই

$$n-\sqrt{\frac{q}{\alpha}}=-\left(n+\sqrt{\frac{q}{\alpha}}\right)e^{-2\sqrt{\alpha q}.t}$$

এর থেকে সহজেই দেখান যায় যে

$$n=\sqrt{\frac{q}{\alpha}}\cdot\frac{1-e^{-2\sqrt{q\alpha}.t}}{1+e^{-2\sqrt{q\alpha}.t}} \tag{1.2}$$

দীর্ঘ সময় পরে, অর্থাৎ যখন $t=\infty$ হয়, তখন $n=\sqrt{\frac{q}{a}}$ ধ্রুবক হয়। অর্থাৎ দীর্ঘ সময় পরে আয়নের সংখ্যা সম্পৃক্ত হয়। একথা ইতিপূর্বে বলা হয়েছে।

এই অবস্থায় যদি আয়ন উৎপত্তি কারককে সরিয়ে নেওয়া হয়, তাহলে কী ঘটবে তা বিবেচনা করা যেতে পারে। এক্ষেত্রে $q=0$ হয়। অতএব আয়ন সংখ্যার পরিবর্তনের হার হয়

$$\frac{dn}{dt}=-\alpha n^2 \tag{1.3}$$

সুতরাং $$\frac{dn}{n^2}=-\alpha\, dt$$

সমাকলন করে পাওয়া যায়

$$-\frac{1}{n}=-\alpha t+\text{ধ্রুবক}$$

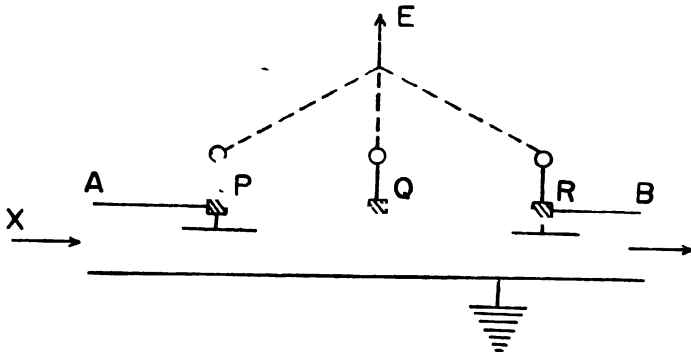
$t=0$ সময়ে $n=n_o$ হয়। সুতরাং উপরোল্লিখিত ধ্রুবক $=-1/n_0$ হয়। অতএব

$$-\frac{1}{n}=-\alpha t-\frac{1}{n_0}=-\frac{1+n_0\alpha t}{n_0}$$

এর থেকে আমরা পাই

$$n=\frac{n_0}{1+n_0\alpha t} \tag{1 4}$$

সমীকরণ (1.4) থেকে পাওয়া যায় যে যখন $t=\infty$ তখন $n=0$ হয়; অর্থাৎ আয়ন উৎপত্তি কারক সরিয়ে নেবার দীর্ঘ সময় পরে গ্যাসের মধ্যে আর কোন আয়ন থাকে না এবং গ্যাস পূর্বাবস্থায় ফিরে আসে।

(1·4) সমীকরণের সাহায্যে আয়নের পুনর্সংযোজন গুণাঙ্কের পরিমাপ সম্ভব। লর্ড রাদারফোর্ড (Lord Rutherford) প্রথম এই পরিমাপ করেন। তাঁর পরিমাপ পদ্ধতি (1.4) চিত্রে দেখান হয়েছে। একটি তুলার প্লাগের মধ্য দিয়ে AB নলে গ্যাস অনুপ্রবেশ করান হয়। এর ফলে গ্যাসের মধ্যে বর্তমান আয়ন সমূহ বিদূরিত হয়। এরপর তেজস্ক্রিয় রশ্মির সাহায্যে X চিহ্নিত স্থানে গ্যাসকে আয়নিত করা হয়। নলের মধ্যে পর পর তিন জায়গায় সমান্তরাল তড়িৎদ্বার যুগল (P,Q,R) রাখা

চিত্র 1.4
পুনর্সংযোজন গুণাংক পরিমাপ করার পরীক্ষা ব্যবস্থা।

থাকে। প্রত্যেক তড়িৎদ্বার যুগলের মধ্যে বিভব প্রভেদ প্রয়োগ করে আয়নন প্রবাহ মাপা হয়। এই আয়নন প্রবাহ তড়িৎদ্বার যুগলের মধ্যবর্তী অঞ্চলে প্রতি একক আয়তনে বর্তমান আয়ন সংখ্যা $n$, অর্থাৎ আয়নের সংখ্যা-ঘনত্বের (Concentration) উপর নির্ভর করে। এক তড়িৎদ্বার যুগল থেকে পরবর্তী তড়িৎদ্বার যুগল পর্যন্ত যাবার পথে কিছু আয়ন পুনর্সংযোজনের ফলে আধানহীন হয়ে যায়। সেজন্য $n$ কমে যায়। অর্থাৎ পরিমিত আয়নন প্রবাহ কমে যায়। বিভিন্ন তড়িৎদ্বার যুগলের মধ্যে আয়নন প্রবাহ পরিমাপ করে (1.4) সমীকরণের সাহায্যে $\alpha$ পরিমাপ করা সম্ভব।

## 1. 5: আয়নীয় গতিশীলতা

পূর্বেই বলা হয়েছে যে বিভব প্রভেদের প্রভাবে আয়নগুলির এক তড়িৎ-দ্বার থেকে অন্য তড়িৎদ্বারের দিকে যাওয়ার ফলে আয়নন প্রবাহের সৃষ্টি হয়। যদি একক আয়তনে বর্তমান আয়নের সংখ্যা হয় $n$ এবং আয়নগুলির গড় বেগ হয় $v$, তাহলে $A$ ক্ষেত্রফল সম্পন্ন দুটি তড়িৎদ্বারের মধ্যে আয়নন প্রবাহের মান হয় $neAv$; এখানে $e$ হচ্ছে আয়নের আধান। যেহেতু ধনাত্মক ও ঋণাত্মক দুই প্রকার আয়নই গ্যাসের মধ্যে বর্তমান থাকে, মোট আয়নন প্রবাহ হয় $neA(v_1+v_2)$; এখানে $v_1$ এবং $v_2$ হচ্ছে দুই প্রকার আয়নের বেগ।

অতএব প্রতীয়মান হয় যে তড়িৎদ্বার দুটির মধ্যে আয়নগুলির গড় বেগের উপর আয়নন প্রবাহ নির্ভরশীল। এই বেগ নির্ণয় করতে হলে

আয়নগুলি এক তড়িৎদ্বার থেকে অন্যটি পর্যন্ত কী ভাবে পরিভ্রমণ করে তা বিবেচনা করতে হবে। বিভব প্রভেদ প্রয়োগের আগে তাপীয় গতির জন্য আয়নগুলি যদৃচ্ছ (At Random) বিচরণ করে। ফলে তড়িৎদ্বার দুটির মধ্যে মোট কোন আয়নন প্রবাহের সৃষ্টি হয়না; কারণ প্রবাহ সৃষ্টির জন্য প্রয়োজন আয়নগুলির কোন নির্দিষ্ট দিকে গতি। বিভব প্রভেদ প্রয়োগ করলে দুই তড়িৎদ্বারের মধ্যে একটি তড়িৎ ক্ষেত্রের সৃষ্টি হয়। ফলে আয়নগুলির যদৃচ্ছ তাপীয় গতির উপর তড়িৎ ক্ষেত্রের প্রভাবে নির্দিষ্ট দিকে অর্জিত প্রবাহ গতি (Drift Motion) আরোপিত হয় এবং তার ফলে তারা তড়িৎ ক্ষেত্রের অভিমুখে অগ্রসর হয়। এইভাবে অগ্রসর হবার পথে অবশ্য তারা গ্যাসের অণুগুলির সংগে বারবার সংঘাত প্রাপ্ত হয়। পরপর দুবার এই রকম সংঘাতের মধ্যে তড়িৎ ক্ষেত্র জনিত বলের জন্য তাদের গতি ত্বরিত (Accelerated) হয়; সংঘাতের সংগে সংগে এই ভাবে অর্জিত বেগ শূন্য হয়ে যায়। বারবার এইরূপ সংঘাতের ফলে তড়িৎ ক্ষেত্রের দিকে অর্জিত বেগ একবার করে হারিয়ে এবং পরে আবার নূতন করে বেগ অর্জন করে আয়নটি বিপরীত তড়িৎদ্বারের দিকে অগ্রসর হতে থাকে এবং অবশেষে সেখানে উপস্থিত হয়। সামগ্রিক ভাবে দেখলে মনে হয় যে আয়নটি নির্দিষ্ট গড় বেগ সহকারে এক তড়িৎদ্বার থেকে অন্যটির দিকে অগ্রসর হয়। ধনাত্মক ও ঋণাত্মক, দুই রকম আয়নই এই ভাবে বিপরীত তড়িৎদ্বারের দিকে অগ্রসর হয়।

যদি তড়িৎদ্বার দুটির মধ্যের দূরত্ব $d$ এবং তাদের মধ্যে প্রযুক্ত বিভব প্রভেদ $V$ হয়, তাহলে তড়িৎ ক্ষেত্রের মান $X = V/d$ হবে।

আয়নের আধান যদি $e$ হয়, তাহলে তার উপর তড়িৎ ক্ষেত্রের জন্য প্রযুক্ত বল $Xe$ হয় এবং ত্বরণ (Acceleration) $f = Xe/m$ হয়; এখানে $m$ হচ্ছে আয়নের ভর। যদি তড়িৎ ক্ষেত্রের প্রভাবে এগিয়ে যাবার পথে গ্যাস অণুগুলির সংগে আয়নটির পরপর দুবার সংঘাত লাভের মধ্যে সময়ের ব্যবধান হয় $t$, তাহলে এইরূপ দুবার সংঘাতের মধ্যে অতিক্রান্ত পথ $s = \frac{1}{2}ft^2 = Xet^2/2m$ হবে। অতএব আয়নের তড়িৎ ক্ষেত্র জনিত গড় বেগ যদি হয় $v$, তাহলে লেখা যেতে পারে

$$v = \frac{s}{t} = \frac{Xet}{2m} \tag{1.5}$$

অর্থাৎ $$v = kX \tag{1.6}$$

এখানে $k = et/2m$ সংখ্যাটিকে বলা হয় 'আয়নের গতিশীলতা' (Mobility)। নির্দিষ্ট চাপ সম্পন্ন বিশেষ ধরণের গ্যাসের মধ্যে বিচরণ-

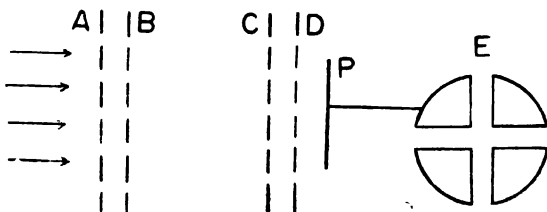
শীল নির্দিষ্ট প্রকৃতির আয়নের জন্য (যার $e$ ও $m$ নির্দিষ্ট), $k$ সংখ্যাটি ধ্রুবক হয়। যদি তড়িৎ ক্ষেত্রের মান একক হয়, অর্থাৎ $X = 1$ ভোল্ট/সেমি হয়, তাহলে আয়নের বেগ $v = k$ হবে। কাজেই আয়নের গতিশীলতা বলতে বোঝায় একক তড়িৎ ক্ষেত্রে অর্জিত আয়নের গড় বেগ।

এখানে উল্লেখযোগ্য যে আয়নগুলি তড়িৎ ক্ষেত্রে যে বেগ অর্জন করে তা তাদের তাপীয় বেগের সংগে ভেক্টর পদ্ধতিতে সংযোজিত হয়ে তাদের মোট বেগ নির্ধারিত করে। প্রযুক্ত তড়িৎ ক্ষেত্র খুব উচ্চ না হলে তাপীয় বেগের তুলনায় তড়িৎ ক্ষেত্র জনিত বেগ অনেক কম হয়। কাজেই যে কোন আয়নের পরপর দুবার সংঘাতের মধ্যেকার সময়ের ব্যবধান $t$ শুধু তাদের গড় তাপীয় বেগ $c$ এর উপর নির্ভর করে বলে ধরা যেতে পারে। অতএব আমরা লিখতে পারি $t = \lambda/c$; এখানে $\lambda$ হচ্ছে আয়নগুলির গড় মুক্তপথ (Mean Free Path)। কাজেই আয়নটির তড়িৎ ক্ষেত্র জনিত গড় বেগ হয়

$$v = \frac{Xet}{2m} = \frac{Xe\lambda}{2mc} = \frac{e\lambda}{2mc} X$$

অতএব আয়নীয় গতিশীলতা হয়

$$k = \frac{e\lambda}{2mc} \tag{1.7}$$

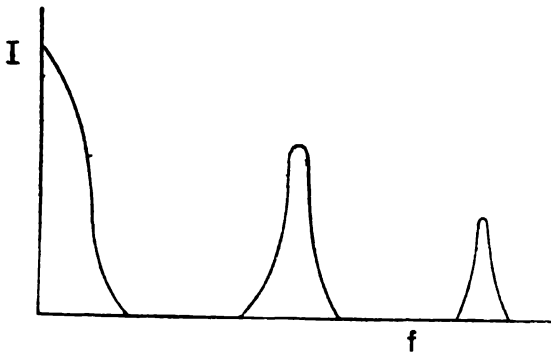
আয়নীয় গতিশীলতা সর্বপ্রথম পরিমাপ করেন রাদারফোর্ড ১৮৯৭ সালে। পরে আরও অনেকে আয়নীয় গতিশীলতা পরিমাপ করেন। (1·5) চিত্রে টিনড্যালের (Tyndal) গতিশীলতা পরিমাপ পদ্ধতি

চিত্র 1.5

টিন্ড্যাল কর্তৃক উদ্ভাবিত আয়নীয় গতিশীলতা পরিমাপ পদ্ধতি

প্রদর্শিত হয়েছে। A, B, C এবং D হচ্ছে চারটি সমান্তরাল তার জালি। এদের ফাঁকের মধ্য দিয়ে আয়নগুলি পার হয়ে যেতে পারে। আয়নগুলিকে

P ধাতব প্লেটের উপর সংগ্রহ করা হয়। P সংযুক্ত থাকে E ইলেকট্রমিটারের সংগে, যার সাহায্যে আয়ন প্রবাহ মাপা হয়। B ও C জালি দুটির মধ্যে সমদিষ্ট (D.C) বিভব প্রভেদ প্রয়োগ করা হয়। A ও B জালিদ্বয়ের মধ্যে পরিবর্তী (A.C) বিভব প্রযুক্ত হয়। C ও D জালি দুটির মধ্যে সমান কম্পাংক সম্পন্ন এবং পূর্বোক্ত বিভবের সংগে সমলয় (Synchronous) পরিবর্তী বিভব প্রয়োগ করা হয়। বাম দিক থেকে আয়ন এসে A ও B জালি দুটির মধ্যবর্তী স্থানে প্রবেশ করে। এই সময় যদি এদের মধ্যে পরিবর্তী তড়িৎ ক্ষেত্র নির্দিষ্ট দিকে ক্রিয়াশীল হয় তাহলে আয়নগুলি A থেকে B এর দিকে আকৃষ্ট হতে পারে। বস্তুতঃ যদি A এবং B জালি দুটির মধ্যের বিভব প্রভেদ এই সময়ে শীর্ষ মানে থাকে তাহলে আয়নগুলি অতি দ্রুত B অতিক্রম করে এর ডান দিকে অগ্রসর হয়। যেহেতু তড়িৎ ক্ষেত্রটি খুব দ্রুত দিক পরিবর্তন করে, অতএব অল্প সময় পূর্বে বা পরে আগত আয়নগুলি B কর্তৃক বিকৃষ্ট হয় এবং A জালির দিকে ফিরে যায়। অর্থাৎ তারা B অতিক্রম করে ডান দিকে যেতে পারে না। কাজেই অতি অল্পক্ষণের জন্য এক গুচ্ছ আয়ন B অতিক্রম করে অগ্রসর হতে পারে। এই আয়নগুলি এখন সমদিষ্ট বিভব প্রভেদের জন্য B থেকে C এর দিকে আকৃষ্ট হয়ে এগিয়ে যায় এবং অবশেষে C জালিটির কাছে উপস্থিত হয়। ঠিক এই মুহূর্তে যদি C এবং D এর মধ্যের পরিবর্তী তড়িৎ ক্ষেত্র এমন দিকে উদ্দিষ্ট থাকে যে আয়নগুলি D এর দ্বারা আকৃষ্ট হয় তাহলে এরা D অতিক্রম করে P প্লেটে আপতিত হয়, যার ফলে ইলেকট্রমিটার E কিছু পরিমাণ আয়ন প্রবাহ নির্দেশ করে। C এবং D জালি দুটির মধ্যে বিভব প্রভেদ ঠিক এই সময়ে শীর্ষমানে থাকা প্রয়োজন। যদি B এবং C জালি দুটির ব্যবধান $d$ হয় এবং আয়নগুলির তড়িৎ ক্ষেত্র জনিত গড় বেগ $v$ হয়, তাহলে B থেকে C পর্যন্ত বিচরণের জন্য তাদের $t=d/v$ সময়ের প্রয়োজন হয়। স্পষ্টতঃ যদি এই সময়ের মান পরিবর্তী বিভবের কম্পন কালের (Time Period) সমান হয়, তাহলেই E ইলেকট্রমিটারে আয়ন প্রবাহ নির্দেশিত হবে।

পরীক্ষাকালে যদি পরিবর্তী বিভবের কম্পাংক পরিবর্তন করা যায়, তাহলে বিশেষ বিশেষ কম্পাংকে ইলেকট্রমিটার কর্তৃক উচ্চ আয়ন প্রবাহ (প্রবাহ শীর্ষ) নির্দেশিত হয়। পাশাপাশি অবস্থিত এইরূপ দুটি প্রবাহশীর্ষের (Current Peak) মধ্যেকার কম্পাংক ব্যবধান থেকে আয়নগুলি কর্তৃক B থেকে C পর্যন্ত যাবার সময় ($t$) নির্ণয় করা যেতে পারে। এর থেকে তাদের গড় বেগ এবং তার থেকে আয়নের গতিশীলতা পাওয়া

যায়। (1·6) চিত্রে কম্পাংকের ($f$) সংগে আয়ন প্রবাহ ($I$) পরিবর্তনের নিদর্শন দেখান হয়েছে।

চিত্র 1.6
টিন্‌ড্যালের পরীক্ষায় কম্পাংকের ($f$) সংগে আয়নন প্রবাহ ($I$) পরিবর্তনের লেখচিত্র।

সমীকরণ (1·7) থেকে দেখা যায় যে আয়নীয় গতিশীলতা গড় মুক্তপথের (Mean Free Path) সমানুপাতিক। গতীয় তত্ত্ব (Kinetic Theory) থেকে পাওয়া যায় যে গড় মুক্তপথ $\lambda$ চাপের ব্যাস্তানুপতিক ($\lambda \propto 1/p$)। অতএব নির্দিষ্ট উষ্ণতায় $k$ সংখ্যাটি চাপের ব্যাস্তানুপাতিক হবে আশা করা যেতে পারে ($k \propto 1/p$)। পরীক্ষার দ্বারা এই সূত্রটির সত্যতা 0·1 মিমি চাপ থেকে 60 বায়ুমণ্ডলীয় চাপ পর্যন্ত প্রমাণিত হয়েছে। ঋণাত্মক আয়নের ক্ষেত্রে 10 সেমি অপেক্ষা কম চাপ সম্পন্ন গ্যাসে পরিমিত গতিশীলতার মান অনেক সময় চাপ কমার সংগে উপরোক্ত সূত্র অপেক্ষা অনেক বেশী তাড়াতাড়ি বৃদ্ধি পেতে দেখা যায়। আয়নিত গ্যাসে ধনাত্মক ও ঋণাত্মক আণবিক আয়ন ছাড়া মুক্ত ইলেকট্রনও থাকে। এদের ভর আণবিক আয়নগুলির ভর অপেক্ষা অনেক কম। যেহেতু আয়নগুলির গড় তাপীয় বেগ $c \propto 1/\sqrt{m}$, অতএব সমীকরণ (1.7) থেকে আমরা পাই $k \propto 1/\sqrt{m}$; অর্থাৎ আয়নের ভর কম হলে তার গতিশীলতা বেশী হয়। কাজেই তড়িৎ ক্ষেত্রের প্রভাবে ইলেকট্রনগুলি আণবিক আয়ন অপেক্ষা অনেক বেশী বেগ অর্জন করে। একটি ইলেকট্রন ঋণাত্মক তড়িৎদ্বার থেকে ধনাত্মক তড়িৎদ্বারের দিকে যাবার পথে অনেক সময় কিছু দূর অগ্রসর হবার পরে আধানহীন একটি অণুর সংগে সংঘাত প্রাপ্ত হয়ে তার সংগে যুক্ত হতে পারে, যার ফলে একটি ভারী ঋণাত্মক আণ-

বিক আয়ন সৃষ্ট হতে পারে। এই নবসৃষ্ট আয়নটি তখন ধনাত্মক তড়িৎদ্বারের দিকে অপেক্ষাকৃত ধীর গতিতে অগ্রসর হয়ে অবশেষে সেখানে উপস্থিত হয়। দুই তড়িৎদ্বারের মধ্যেকার পথ অতিক্রমণের জন্য প্রয়োজনীয় সময় এক্ষেত্রে প্রধানতঃ ইলেকট্রনের বেগের উপর নির্ভর করে, কারণ অণুর সংগে ইলেকট্রন সংযোগের ফলে উৎপন্ন ভারী ঋণাত্মক আয়নগুলি সাধারণতঃ ধনাত্মক তড়িৎদ্বার থেকে খুব অল্প দূরত্বে সৃষ্ট হয় এবং তার ফলে সেটিকে অপেক্ষাকৃত অনেক কম পথ অতিক্রম করতে হয়। কাজেই নির্ণীত বেগ এক্ষেত্রে অপেক্ষাকৃত অনেক বেশী বলে মনে হয় এবং সেজন্য পরিমিত গতিশীলতার মানও অনেক বেশী হয়। চাপ যত কম হয়, ইলেকট্রন তত বেশী দূরে অগ্রসর হবার পর সংঘাত লাভ করে ঋণাত্মক আয়ন সৃষ্টি করে। কাজেই চাপ কমার সংগে $k$ খুব বেশী তাড়াতাড়ি বৃদ্ধি পায় বলে মনে হয়।

সমীকরণ (1.7) থেকে আয়নীয় গতিশীলতার যে মান পাওয়া যায়, পরিমিত মানের তা প্রায় তিনগুণ বা আরও বেশী হয়। এর থেকে বোঝা যায় যে এই সমীকরণ সম্পূর্ণ সঠিক নয়। এই সমীকরণ প্রতিপন্ন করার সময় আয়ন ও গ্যাস অণুর মধ্যে ক্রিয়াশীল বল উপেক্ষা করা হয়েছিল। বস্তুত আয়ন ও গ্যাস অণুগুলি যখন খুব কাছাকাছি আসে তখন তদের মধ্যে একরকম বল ক্রিয়াশীল হয় বলে অনুমান করা হয়। এর জন্য আয়নের গড় মুক্তপথের মান গতীয় তত্ত্ব থেকে প্রাপ্ত মান অপেক্ষা অনেক কম হয়। এই সঠিকতর তত্ত্ব থেকে প্রাপ্ত $k$ এবং পরিমিত মানের মধ্যে গরমিল অপেক্ষাকৃত অনেক কম পাওয়া যায়।

## 1.6: বিভব প্রভেদ পরিবর্তনের সংগে আয়নন প্রবাহ পরিবর্তনের ব্যাখ্যা

সমীকরণ (1.2) থেকে আমরা দেখি যে বিভব-প্রভেদের অনুপস্থিতিতে, আয়ন উৎপাদন শুরু হবার দীর্ঘ সময় পরে ($t = \infty$), প্রতি একক আয়তনে উপস্থিত আয়ন সংখ্যা ($n$) সম্পৃক্ত হয়ে যায়। তড়িৎ ক্ষেত্রের ক্রিয়া শুরু হবার পর উপস্থিত ধনাত্মক ও ঋণাত্মক আয়নগুলি বিপরীত তড়িৎদ্বার-দ্বয়ের দিকে অগ্রসর হতে থাকে। যদি $k_p$ এবং $k_n$ এই দুই প্রকার আয়নের গতিশীলতা হয়, তাহলে তড়িৎদ্বার দুটির মধ্যে আয়ন প্রবাহ ঘনত্ব (Ion Current Density) হয়

$$\bar{J} = (k_p + k_n)Xne$$

শুরুতে যখন বিভব প্রভেদ $V$ এবং ক্ষেত্র প্রাবল্য $X = V/d$ কম থাকে, তখন একক আয়তনে বর্তমান আয়ন-যুগলের সংখ্যা $n = n_0 =$ ধ্রুবক

ধরা যেতে পারে; কারণ তাদের মধ্যে খুব অল্প সংখ্যক আয়নই তড়িৎদ্বার দুটির দিকে চলে যায়। কাজেই

$$J = (k_p + k_n) X n_0 e = (k_p + k_n) n_0 e \, V/d$$

অর্থাৎ $J \propto V$

এর থেকে দেখা যায় যে আয়ন প্রবাহ ঘনত্ব $J$ বিভব-প্রভেদ $V$ এর সমানুপাতিক। এই ভাবে (1.3) চিত্রে প্রদর্শিত বিভব-প্রভেদের সংগে আয়নন প্রবাহ পরিবর্তন লেখচিত্রের গোড়ার দিকটা ব্যাখ্যা করা যায়।

ক্ষেত্র প্রাবল্য $X$ বৃদ্ধির সঙ্গে আয়নগুলি তড়িৎদ্বারদ্বয়ের দিকে আকৃষ্ট হবার ফলে একক আয়তনে উপস্থিত আয়নের সংখ্যা ($n$) হ্রাস পায়। কাজেই $X$ বৃদ্ধির সঙ্গে $J$ বৃদ্ধির হার কমে যায়। ক্ষেত্র প্রাবল্য যথেষ্ট বৃদ্ধি পেলে আয়নগুলি পুনর্সংযোজনের বিশেষ সুযোগ পায় না। ফলে বহিস্থ কারকের ক্রিয়ার জন্য প্রতি সেকেণ্ডে যতগুলি আয়ন উৎপন্ন হয় ঠিক ততগুলি আয়ন প্রতি সেকেণ্ডে তড়িৎদ্বার কর্তৃক সংগৃহীত হয়। যদি তড়িৎদ্বার দুটির মধ্যের গ্যাসের আয়তন হয় $v$ এবং প্রতি সেকেণ্ডে একক আয়তনে আয়ন সৃষ্টির হার হয় $q$ তাহলে এক্ষেত্রে মোট আয়নন প্রবাহ হয়

$$i = q\,v\,e = i_s = \text{ধ্রুবক}$$

এর থেকে আয়নন প্রবাহ সম্পৃক্ত হবার কারণ বোঝা যায়।

খুব উচ্চ বিভব প্রভেদে আয়নন প্রবাহের আবার সহসা অতিরিক্ত বৃদ্ধির কারণ হচ্ছে গ্যাসের মধ্যে সংঘাতের দ্বারা আয়ন সৃষ্টি (Ionization by Collision)। এ সম্বন্ধে পরবর্তী অনুচ্ছেদে আলোচনা করা হবে।

### 1.7: সংঘাতের দ্বারা আয়ন উৎপাদন

তড়িৎদ্বার দুটির মধ্যে প্রযুক্ত বিভব প্রভেদ $V$ খুব উচ্চ হলে, তড়িৎ ক্ষেত্র প্রাবল্য $X = V/d$ খুব উচ্চ হয়। যদি আয়নের আধান হয় $e$, তাহলে তার উপর তড়িৎ ক্ষেত্রের জন্য প্রযুক্ত বল হয় $Xe$ এবং এই বল দ্বারা আকৃষ্ট হয়ে $\Delta l$ পথ অতিক্রম করতে একটি আয়ন যে শক্তি অর্জন করে তার পরিমাণ হয়

$$\Delta W = Xe\,\Delta l$$

তড়িৎ ক্ষেত্র যথেষ্ট উচ্চ হলে, গ্যাস অণুগুলির সঙ্গে একটি আয়নের পরপর দুবার সংঘাতের মধ্যে অর্জিত এই শক্তির পরিমাণ এত বেশী হতে পারে যে সেটির সঙ্গে যখন আর একটি অণুর সংঘাত হয় তখন দ্বিতীয় অণুর দেহ থেকে একটি ইলেকট্রন বিচ্ছিন্ন হয়ে যেতে পারে। ফলে এই অণুটি ধনাত্মক আয়নে পরিণত হয়। এই সংঘটনকে বলা হয় 'সংঘাতের দ্বারা আয়ন সৃষ্টি' (Ionization by Collision)। এইভাবে উৎপন্ন নূতন আণবিক আয়নগুলি এবং তাদের উৎপন্নকারী আয়নগুলিও আবার তড়িৎ ক্ষেত্রের প্রভাবে ত্বরিত (Accelerated) গতিতে অগ্রসর হতে থাকে। পরবর্তী সংঘাতের আগেই যদি তারা আবার যথেষ্ট পরিমাণ শক্তি অর্জন করতে পারে, তাহলে তাদের কোন কোনটি আবার অন্যান্য গ্যাস অণুকে সংঘাত দ্বারা আয়নিত করতে পারে। এইভাবে পুনঃ পুনঃ সংঘাতের ফলে নূতন নূতন আয়ন সৃষ্টি হতে থাকে এবং মোট উৎপন্ন আয়ন সংখ্যা খুব দ্রুত বৃদ্ধি পায়। বিভব-প্রভেদ যত বাড়ান যায় আয়নগুলি কর্তৃক তড়িৎ ক্ষেত্রে অর্জিত শক্তির পরিমাণও তত বাড়ে এবং সংঘাতের দ্বারা নূতন আয়ন সৃষ্টির সম্ভাব্যতাও বৃদ্ধি পায়। যেহেতু এই সমস্ত উৎপন্ন আয়ন তড়িৎদ্বার কর্তৃক সংগৃহীত হয়ে মোট আয়নন প্রবাহের সৃষ্টি করে, অতএব বিভব-প্রভেদ বৃদ্ধির সঙ্গে সঙ্গে আয়নন প্রবাহও আবার বৃদ্ধি পায়। পরপর দুবার সংঘাতের মধ্যে একটি আয়ন কর্তৃক অতিক্রান্ত পথ $\Delta l$ আয়নগুলির গড় মুক্তপথের প্রায় সমান হয়। যেহেতু চাপ $p$ কমালে গড় মুক্তপথ $\lambda$ বাড়ে, অতএব আয়ন কর্তৃক অর্জিত শক্তি $\Delta W$ চাপ কমালে বাড়ে। কাজেই সংঘাতের দ্বারা আয়ন সৃষ্টির সম্ভাব্যতা নিম্নতর চাপে বেশী হয়।

একটি অণু থেকে ইলেকট্রন বিচ্ছিন্ন করে আয়ন-যুগল সৃষ্টির জন্য নিম্নতম প্রয়োজনীয় শক্তির মান $W_0$ ধরা যাক। একটি আয়ন কর্তৃক গ্যাস অণুর সঙ্গে সংঘাতের দ্বারা নূতন আণবিক আয়ন উৎপন্ন করার জন্য ন্যূনতম অতিক্রমণীয় পথ যদি হয় $x_0$, তাহলে আমরা লিখতে পারি

$$W_0 = Xex_0$$

$$x_0 = W_0/Xe$$

অর্থাৎ আয়নটি যদি $x > x_0$ পথ বিনা সংঘাতে অতিক্রম করতে পারে তবেই সেটি পরে সংঘাতের দ্বারা নূতন আয়ন সৃষ্টি করতে পারে।

গতীয় তত্ত্ব থেকে জানা আছে যে যদি কোন অণুর বা আয়নের গড় মুক্তপথ হয় $\lambda$, তাহলে $x$ দূরত্ব অতিক্রম করার পর অণুটির বা আয়নটির

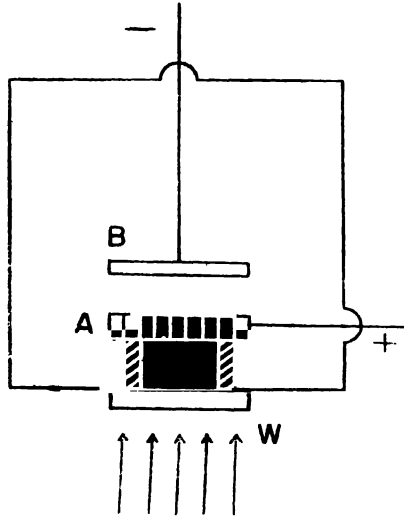
অন্য কোনও অণুর সংগে সংঘাত প্রাপ্ত না হবার সম্ভাব্যতা $e^{-x/\lambda}$ হয়। অর্থাৎ $e^{-x/\lambda}$ হচ্ছে $x$ অপেক্ষা দীর্ঘতর পথ অতিক্রম করার সময়ে আয়নটির সংঘাত লাভের সম্ভাব্যতা। এখন একক পথ অতিক্রম করতে আয়নটি $1/\lambda$ সংখ্যক বার সংঘাত প্রাপ্ত হয়। এদের মধ্যে কিছু সংঘাত ঘটে যখন পরপর দুবার সংঘাতের মধ্যে অতিক্রান্ত পথ $x_0$ অপেক্ষা কম হয়, আর অন্য সংঘাতগুলি ঘটে যখন এই অতিক্রান্ত পথ $x_0$ অপেক্ষা দীর্ঘতর হয়। স্পষ্টতঃ একক পথ অতিক্রম করতে শেষোক্ত ধরণের সংঘাতের সংখ্যা $\alpha = (1/\lambda)\ e^{-x_0/\lambda}$ হয়।

এই ধরণের সংঘাতের দ্বারা নূতন আয়নের সৃষ্টি হয়। অর্থাৎ একক পথ অতিক্রম করতে একটি আয়ন সংঘাত দ্বারা $\alpha$ সংখ্যক নূতন আয়ন উৎপন্ন করে। আবার $\lambda \propto 1/p$; অর্থাৎ $1/\lambda = Cp$ ($C =$ ধ্রুবক) লেখা যেতে পারে। সুতরাং

$$\alpha = Cpe^{-CpW_0/Xe} \tag{1.8}$$

সমীকরণ (1.8) থেকে দেখা যায় যে চাপ কমানর সংগে $\alpha$ বেড়ে যায়। অর্থাৎ চাপ কমালে আয়নন প্রবাহ বৃদ্ধি পায়। পরীক্ষালব্ধ তথ্যের সংগে এই সিদ্ধান্তের সংগতি পাওয়া যায়।

## 1.8: টাউনসেন্ডের পরীক্ষা; সংঘাত জনিত আয়ননের তত্ত্ব

টাউনসেন্ড (Townsend) সংঘাতের দ্বারা আয়ন উৎপত্তি সংক্রান্ত নানাবিধ পরীক্ষা অনুষ্ঠিত করেন। তাঁর পরীক্ষা পদ্ধতি (1·7) চিত্রে দেখান হয়েছে। A এবং B দুটি তড়িৎদ্বার একটি নিম্ন বায়ুচাপ সম্পন্ন আবদ্ধ আধারের মধ্যে অবস্থিত থাকে। বাইরে থেকে অতিবেগনী রশ্মি (Ultra Violet Rays) স্ফটিক (Quartz) নির্মিত W জানালার মধ্য দিয়ে আধারে প্রবেশ করে A অ্যানোড ভেদ করে B ক্যাথোডের উপরে আপতিত হয়। A অ্যানোডটি রুপার দ্বারা প্রলিপ্ত স্ফটিক নির্মিত একটি প্লেট। রুপার প্রলেপের উপরে কতকগুলি সূক্ষ্ম দাগ কাটা থাকে, যাদের মধ্য দিয়ে অতিবেগনী রশ্মি পার হয়ে যেতে পারে। অতিবেগনী রশ্মির প্রভাবে ক্যাথোডতল থেকে ফোটো ইলেকট্রন নির্গত হয় (4.2 অনুচ্ছেদ দ্রষ্টব্য)। নির্গত ইলেকট্রনগুলি A অ্যানোডের দিকে আকৃষ্ট হয়। অ্যানোডের দিকে যাবার সময় এরা আধানহীন গ্যাস অণুগুলির সংগে সংঘাতের দ্বারা নূতন আয়ন-যুগল সৃষ্টি করে। এদের মধ্যে ঋণাত্মক আয়নগুলি হচ্ছে ইলেকট্রন। এগুলি আবার অ্যানোডের দিকে

চিত্র 1.7
টাউনসেণ্ডের পরীক্ষা ব্যবস্থা। W হচ্ছে একটি স্ফটিক নির্মিত জানালা। A হচ্ছে ধাতু দ্বারা প্রলিপ্ত স্ফটিক প্লেট। এর উপরে দাগ কাটা থাকে, যার ভিতর দিয়ে অতিবেগনী রশ্মি পার হয়ে যেতে পারে।

এগিয়ে যাবার পথে সংঘাত দ্বারা আরও ধনাত্মক আয়ন ও ঋণাত্মক ইলেকট্রন উৎপন্ন করে। টাউনসেণ্ড প্রথমে অনুমান করেন যে কেবল ঋণাত্মক আয়নগুলিই (অর্থাৎ ইলেকট্রনগুলি) সংঘাত দ্বারা নূতন আয়ন সৃষ্টি করে, ধনাত্মক আয়নগুলি করে না। আমরা জানি যে একক পথ অতিক্রম করতে একটি ঋণাত্মক আয়ন (ইলেকট্রন) সংঘাতের দ্বারা $\alpha$ সংখ্যক নূতন আয়ন-যুগল সৃষ্টি করে: এখানে $\alpha$ সংখ্যাটির মান সমীকরণ (1·5) দ্বারা নির্ধারিত হয়। মনে করা যাক যে, ফোটোক্যাথোড B থেকে $x$ দূরত্বে বর্তমান $n$ সংখ্যক ঋণাত্মক আয়ন $dx$ পথ অতিক্রম করতে সংঘাতের দ্বারা $dn$ সংখ্যক নূতন আয়ন-যুগল উৎপন্ন করে। স্পষ্টতঃ

$$dn = n\alpha\, dx$$

অথবা $$\frac{dn}{n} = \alpha\, dx$$

এর থেকে পাওয়া যায় $n = Ae^{\alpha x}$

যদি আপতিত অতিবেগনী রশ্মির প্রভাবে ফোটোক্যাথোডের একক ক্ষেত্রফল থেকে প্রতি সেকেণ্ডে নির্গত ফোটো ইলেকট্রনের সংখ্যা $n_0$ হয়, তাহলে যখন $x = 0$ হয়, তখন $n = n_0$ হয়। অতএব $A = n_0$ পাওয়া যায়। সুতরাং

$$n = n_0 e^{\alpha x} \alpha \tag{1.9}$$

কাজেই ক্যাথোড থেকে $d$ দূরত্বে অবস্থিত অ্যানোডে প্রতি সেকেণ্ডে সংগৃহীত আয়নের সংখ্যা হয়

$$n_d = n_0 e^{\alpha d} \tag{1.10}$$

সুতরাং মোট আয়ন প্রবাহ হয়

$$i = n_0 \epsilon e^{\alpha d} = i_0 e^{\alpha d} \tag{1.11}$$

এখানে $\epsilon$ হচ্ছে আয়নের আধান। $i_0$ হচ্ছে আলোকতাড়িত প্রবাহ (Photoelectric Current)। $\alpha$ সংখ্যাটিকে বলা হয় 'টাউনসেণ্ড গুণাংক' (Townsend Coefficient)। পরীক্ষা দ্বারা পরিমিত আয়নন প্রবাহের বৃদ্ধির হার এবং সমীকরণ (1·11) থেকে প্রাপ্ত বৃদ্ধির হারের মধ্যে সংগতি দেখা যায় কেবল যখন তড়িৎদ্বার দুটির মধ্যের দূরত্ব $d$ খুব কম থাকে ($d < 0·06$ সেমি)। $d$ যখন বেশী হয়, পরিমিত আয়নন প্রবাহ তখন অপেক্ষাকৃত অনেক দ্রুততর হারে বৃদ্ধি পায়।

এই গরমিলের কারণ খুঁজতে গিয়ে টাউনসেণ্ড পরে অনুমান করেন যে ঋণাত্মক ইলেকট্রন এবং ধনাত্মক আয়ন, উভয়েই সংঘাত দ্বারা নূতন আয়ন সৃষ্টি করে ($\beta$ - প্রক্রিয়া)। এই অনুমানের ভিত্তিতে উদ্ভাবিত তত্ত্ব থেকে প্রাপ্ত আয়নন প্রবাহ বৃদ্ধির হার এবং পরীক্ষালব্ধ হারের মধ্যে কোন সঙ্গতি পাওয়া যায় না।

বস্তুতঃ একটি গুরুভার ধনাত্মক আয়ন ও একটি আধানহীন অণুর মধ্যে যখন সংঘাত ঘটে, তখন প্রধানতঃ সম্পূর্ণ অণুটির সঙ্গেই শক্তি বিনিময় ঘটে। অণুর দেহ সংলগ্ন ইলেকট্রনগুলি এক্ষেত্রে অণু কর্তৃক অর্জিত শক্তির অতি অল্প অংশই পেয়ে থাকে। যার ফলে সেগুলি অণু থেকে বিচ্ছিন্ন হতে পারে না। অণুর দেহ সংলগ্ন ইলেকট্রনকে বিচ্ছিন্ন করতে হলে যতটা শক্তির প্রয়োজন তা সরবরাহ করতে হলে আয়নটিকে খুব উচ্চ শক্তি সম্পন্ন হতে হবে। প্রকৃতপক্ষে সংঘাত দ্বারা আয়নন ঘটাতে একটি ইলেকট্রনের যতটা ন্যূনতম শক্তি থাকা প্রয়োজন, আয়নের ক্ষেত্রে

তার শতাধিক গুণ বেশী শক্তির প্রয়োজন। অথচ গুরুভার ধনাত্মক আয়নগুলির গড় মুক্তপথ ইলেকট্রনের তুলনায় অনেক কম হওয়ায় পরপর দুবার সংঘাতের মধ্যে তারা ইলেকট্রনগুলি অপেক্ষা অনেক কম শক্তি অর্জন করে। কাজেই ধনাত্মক আয়ন কর্তৃক সংঘাতের দ্বারা আয়ন উৎপত্তি প্রায় হয় না বললেই চলে।

$\beta$-প্রক্রিয়া তত্ত্বের এই অসুবিধার জন্য টাউনসেন্ড পরে আর একটি নূতন প্রক্রিয়া কল্পনা করেন। একে বলা হয় $\gamma$-প্রক্রিয়া। এই নূতন কল্পিত প্রক্রিয়ায় ধনাত্মক আয়নগুলি গ্যাস অণুর সঙ্গে সংঘাতের দ্বারা নূতন আয়ন সৃষ্টি করে না। কিন্তু তারা ক্যাথোড কর্তৃক আকৃষ্ট হয়ে তার উপর গিয়ে পড়লে তার উপরিতল থেকে ইলেকট্রন নির্গত হয়। অতিবেগনী রশ্মি কর্তৃক ক্যাথোড থেকে নির্গত ইলেকট্রনগুলির সংখ্যার সঙ্গে এদের সংখ্যা যুক্ত হওয়ার ফলে $n_0$ সংখ্যাটির মান কার্যতঃ অনেক বেড়ে যায়। মনে করা যাক যে একটি ধনাত্মক আয়ন ক্যাথোড থেকে $\gamma$ সংখ্যক ইলেকট্রন নির্গত করতে পারে।

সমীকরণ (1·10) থেকে দেখা যায় যে যদি ক্যাথোড থেকে $n_0$ ইলেকট্রন নির্গত হয় তাহলে অ্যানোডে সংগৃহীত ইলেকট্রনের সংখ্যা $n_0 e^{\alpha d}$ হয়। কাজেই সংঘাতের ফলে উৎপন্ন নূতন ইলেকট্রনের সংখ্যা $n_0(e^{\alpha d}-1)$ হয়। স্পষ্টতঃ সমান সংখ্যক ধনাত্মক আয়নও গিয়ে ক্যাথোডে পড়ে। এরা ক্যাথোড থেকে $n_0\gamma(^{\alpha d}-1)$ সংখ্যক ইলেকট্রন উচ্ছিন্ন করে। ফলে এদের জন্য অ্যানোডে সংগৃহীত ইলেকট্রনের সংখ্যা $n_0\gamma(e^{\alpha d}-1)e^{\alpha d}$ হয়। কাজেই সংঘাত দ্বারা নূতন উৎপন্ন আয়ন-যুগলের সংখ্যা হয়

$$n_0\gamma(e^{\alpha d}-1)(e^{\alpha d}-1) = n_0\gamma(e^{\alpha d}-1)^2$$

এদের মধ্যে ধনাত্মক আয়নগুলি আবার ক্যাথোডে আপতিত হয়ে নূতন করে ইলেকট্রন উচ্ছিন্ন করে, যার সংখ্যা $n_0\gamma^2(e^{\alpha d}-1)^2$ হয়। এরা আবার অ্যানোডের দিকে যাবার সময় নূতন নূতন আয়ন উৎপন্ন করে। এইরূপ প্রক্রিয়ার বার বার পুনরাবৃত্তির ফলে অবশেষে অ্যানোডে সংগৃহীত ইলেকট্রনের মোট সংখ্যা হয়

$$n = n_0 e^{\alpha d}[1+\gamma(e^{\alpha d}-1)^1+\gamma^2(e^{\alpha d}-1)^2+\cdots]$$

$$\frac{n_0 e^{\alpha d}}{1-\gamma(e^{\alpha d}-1)}$$

অতএব মোট আয়নন প্রবাহ হয়

$$i = \frac{i_0 e^{\alpha d}}{1-\gamma(e^{\alpha d}-1)} \qquad (1.12)$$

এখানে পূর্বের মতই $i_o$ হচ্ছে আলোকতাড়িত প্রবাহ।

সমীকরণ (1·12) ও পরীক্ষালব্ধ তথ্যের মধ্যে ভাল সংগতি পাওয়া যায়। সমীকরণ (1·12) থেকে দেখা যায় যে সাধারণতঃ $i/i_o >> 1$ হয়; অর্থাৎ বহিস্থ কারকের ক্রিয়ার দ্বারা উৎপন্ন প্রাথমিক আয়নন প্রবাহের তুলনায় পরিমিত চরম (Final) আয়নন প্রবাহ অপেক্ষাকৃত অনেক বেশী হয়। অর্থাৎ সংঘাতের দ্বারা আয়নন উৎপত্তির জন্য আয়নন প্রবাহ প্রাথমিক মান থেকে যথেষ্ট পরিমাণে পরিবর্ধিত (Amplified) হয়।

### 1.9: স্ফুলিংগ মোক্ষণের উৎপত্তি

সমীকরণ (1·12) থেকে প্রাপ্ত আয়নন প্রবাহের মান অসীম হয়ে যায় যদি $1-\gamma(e^{\alpha d}-1)=0$ হয়। অর্থাৎ যদি তড়িৎদ্বার দুটির ব্যবধান হয়

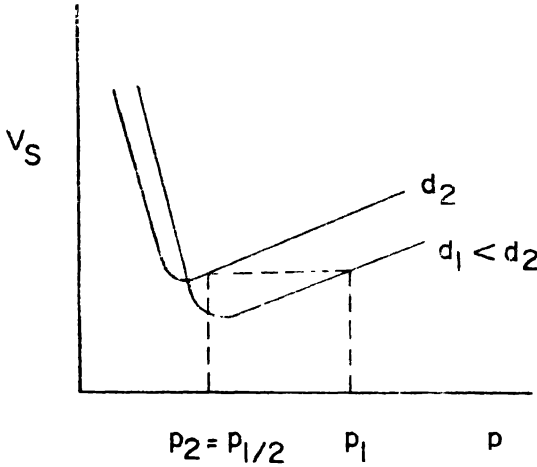
$$d = d_s = \frac{1}{\alpha} \ln \frac{1+\gamma}{\gamma} \qquad (1.13)$$

এই অবস্থায় তড়িৎদ্বার দুটির মধ্যে তড়িৎ স্ফুলিংগের (Spark) সৃষ্টি হয়। তড়িৎদ্বার দুটির মধ্যের ব্যবধান $d$ যদি ক্রমশঃ কমান যায় ($X$ ও $p$ ধ্রুবক রেখে) তাহলে $d=d_s$ ব্যবধানে তাদের মধ্যে তড়িৎ স্ফুলিংগ উৎপন্ন হয়। সমীকরণ (1·13) থেকে এই স্ফুলিংগ দূরত্ব $d_s$ পাওয়া যায়।

পরীক্ষার দ্বারা দেখা যায় যে যদি গ্যাসের চাপ $p$ ও তড়িৎদ্বার দুটির ব্যবধান $d$ ধ্রুবক রেখে তাদের মধ্যেকার বিভব প্রভেদ $V$ ক্রমশঃ বাড়ান যায় তাহলে $V$ যখন একটি নির্দিষ্ট মান $V_s$ (স্ফুলিংগ বিভব) অপেক্ষা উচ্চতর হয় তখনই স্ফুলিংগ উৎপন্ন হয়।

আবার $V$ ধ্রুবক রেখে নির্দিষ্ট চাপে তড়িৎদ্বার দুটির ব্যবধান যদি কমান হয়, তাহলে $d$ যখন একটি নির্দিষ্ট মান $d_s$ অপেক্ষা কম হয়, তখনই স্ফুলিংগ দেখা দেয়।

অপর পক্ষে $V$ ও $d$ ধ্রুবক রাখলে তড়িৎদ্বার দুটির মধ্যে স্ফুলিংগ উৎপন্ন হয় যদি গ্যাসের চাপ $p$ একটি নির্দিষ্ট মান অপেক্ষা কম করা হয়। তবে চাপ যদি খুব কমে যায় তাহলে কিন্তু স্ফুলিংগ সহজে উৎপন্ন হয় না। এক্ষেত্রে বিভব-প্রভেদ অত্যধিক উচ্চ হলে তবেই স্ফুলিংগ উৎপন্ন হয়।

(1·8) চিত্রে দুই বিভিন্ন তড়িৎদ্বার ব্যবধানে স্ফুলিংগ-বিভব ও গ্যাসের চাপের লেখচিত্র দেখান হয়েছে। চিত্র থেকে দেখা যায় যে চাপ কমালে

চিত্র 1.8
স্ফুলিংগ বিভব এবং চাপের লেখচিত্র। $d_1$ ও $d_2$ হচ্ছে দুই বিভিন্ন তড়িৎদ্বার ব্যবধান।

$V_s$ প্রথমে কমে, কিন্তু খুব নিম্ন চাপের ক্ষেত্রে $p$ কমানর সংগে $V_s$ বৃদ্ধি পেয়ে খুব উচ্চে উঠে যায়। একটি নির্দিষ্ট চাপে $V_s$ এর মান নিম্নতম হয়। $d$ বাড়ালে এই নির্দিষ্ট চাপের মান কম হয়। চাপ কমলে আয়নগুলির গড় মুক্তপথ বাড়ে। কাজেই অপেক্ষাকৃত নিম্ন তড়িৎক্ষেত্রেও আয়নগুলি পরপর দুবার সংঘাতের মধ্যে যথেষ্ট শক্তি অর্জন করতে সমর্থ হয়, যার ফলে তারা সংঘাতের দ্বারা নূতন আয়ন সৃষ্টি করতে পারে। চাপ কমার সংগে স্ফুলিংগ বিভবের মান কেন কমে তা এই ভাবে বোঝা যায়। চাপ খুব কমে গেলে গড় মুক্তপথ এত দীর্ঘ হয় যে আয়নগুলির সংঘাত লাভের সম্ভাব্যতা খুব কমে যায়। কাজেই স্ফুলিংগ-বিভব যথেষ্ট উচ্চ না হলে নূতন আয়ন সৃষ্টির দ্বারা স্ফুলিংগ উৎপাদনের সম্ভাব্যতাও কমতে থাকে। এইভাবে খুব নিম্ন চাপে স্ফুলিংগ বিভবের যে বৃদ্ধি লক্ষ্য করা যায়, তা ব্যাখ্যা করা সম্ভব।

### 1. 10: পাশেনের সূত্র

এই সূত্র অনুসারে স্ফুলিংগ বিভব $V_s$ হচ্ছে গ্যাসের চাপ ও তড়িৎদ্বার ব্যবধানের গুণফল ($pd_s$) সংখ্যাটির একটি গাণিতিক অপেক্ষক (Func-

tion)। অর্থাৎ $V_s = F(pd_s)$ হয়। ইতিপূর্বে সংঘাত দ্বারা আয়নন উৎপাদনের যে তত্ত্ব আলোচিত হয়েছে তার থেকে পাশেনের সূত্রটি (Paschen's Law) ব্যাখ্যা করা যায়।

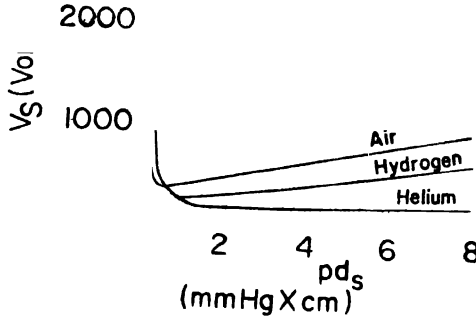
সমীকরণ (1·8) থেকে আমরা দেখি যে $\alpha/p$ হচ্ছে $X/p$ সংখ্যাটির অপেক্ষক; অর্থাৎ $\alpha/p = f(X/p)$। আবার (1·13) সমীকরণের অন্তর্গত $\gamma$ সংখ্যাটিও হচ্ছে $(X/p)$ এর অপেক্ষক; কারণ একটি ধনাত্মক আয়ন ক্যাথোড-তল থেকে কতগুলি ইলেকট্রন উচ্ছিন্ন করবে তা নির্ভর করে আয়ন কর্তৃক অর্জিত শক্তির উপর এবং ক্যাথোড-তলের প্রকৃতির উপর। পরপর দুবার সংঘাতের মধ্যে আয়ন কর্তৃক অর্জিত শক্তি হচ্ছে $Xe\lambda \propto X/p$; কাজেই আশা করা যায় যে ক্ষেত্র প্রাবল্য $X$ এবং গ্যাসের চাপ $p$ এর উপর $\gamma$ এবং $\alpha$ সংখ্যা দুটির নির্ভরশীলতা সমরূপী হবে। তফাৎ শুধু এই হবে যে গ্যাসের মধ্যে একক পথ অতিক্রম করতে ইলেকট্রনটি যতগুলি সংঘাতের সম্মুখীন হয়, $\alpha$ তার উপরেও নির্ভরশীল হয়। এই শেষোক্ত সংখ্যার মান $1/\lambda$ হয়। অপরপক্ষে $\gamma$ এই শেষোক্ত রাশির উপর নির্ভরশীল নয়। কাজেই আমরা লিখতে পারি $\gamma = g(X/p)$। অতএব সমীকরণ (1·13) থেকে আমরা পাই (যেহেতু $\gamma \ll 1$),

$$pd_s = \frac{1}{f(X/p)} \ln \frac{1}{g(X/p)} = \frac{1}{f(V_s/pd_s)} \ln \frac{1}{g(V_s/pd_s)}$$

এর থেকে বোঝা যায় যে স্ফুলিংগ বিভব $V_s$ হচ্ছে $(pd_s)$ সংখ্যাটির অপেক্ষক। $V_s$ এবং $(pd_s)$ সংখ্যা দুটির পারস্পরিক সম্পর্ককে পাশেনের সূত্র (Paschen's Law) বলা হয়।

পাশেনের সূত্রের ভৌতিক ব্যাখ্যা সহজেই করা যায়। যেহেতু গ্যাসের চাপ $p$ একক আয়তনে বর্তমান গ্যাস অণুর সংখ্যা $\nu$ এর সমানুপাতিক, অতএব $pd_s \propto \nu d_s$ লেখা যায়। তড়িৎদ্বার দুটির মধ্যে বর্তমান গ্যাস অণুর মোট সংখ্যা হচ্ছে $\nu d_s$ সংখ্যাটির সমানুপাতিক। স্পষ্টতঃ তড়িৎদ্বার দুটির মধ্যে উৎপন্ন আয়নের সংখ্যা এবং যে বিভব প্রভেদে এই সংখ্যা বৃদ্ধি পেয়ে তড়িৎ স্ফুলিংগ সৃষ্টি করে তারা উভয়েই তড়িৎদ্বার দুটির মধ্যে বর্তমান গ্যাস অণুর সংখ্যার উপর নির্ভরশীল হবে, অর্থাৎ এরা $(pd_s)$ সংখ্যাটির উপর নির্ভরশীল হবে।

যদি একটি নির্দিষ্ট তড়িৎদ্বার ব্যবধানে বিভিন্ন চাপে স্ফুলিংগ বিভব $V_s$ জানা থাকে, তাহলে পাশেনের সূত্রের সাহায্যে তার থেকে যে কোন তড়িৎদ্বার ব্যবধানে এবং যে কোন চাপে, $V_s$ এর মান পাওয়া যেতে পারে।

উদাহরণ স্বরূপ বলা যেতে পারে যে একটি নির্দিষ্ট চাপ $p_1$ ও নির্দিষ্ট তড়িৎদ্বার ব্যবধান $d_1$ এর ক্ষেত্রে স্ফুলিংগ বিভব যদি হয় $V_s$, তাহলে অন্য যে কোন চাপ $p_2 = np_1$ এবং তড়িৎদ্বার ব্যবধান $d_2 = d_1/n$ এর ক্ষেত্রেও স্ফুলিংগ বিভবের মান $V_s$ হবে। (1·9) চিত্রে কয়েকটি বিভিন্ন

চিত্র 1.9

পাশেনের সূত্রের লেখচিত্ররূপ।

গ্যাসের ক্ষেত্রে $(pd_s)$ সংখ্যাটির সংগে $V_s$ পরিবর্তনের লেখচিত্র দেখান হয়েছে। যদি গ্যাসের অবস্থা (State) লেখচিত্র এবং $V_s$ ও $(pd_s)$ অক্ষ দুটির মধ্যবর্তী অঞ্চলে অবস্থিত যে কোন বিন্দু দ্বারা নির্ধারিত হয়, তাহলে গ্যাসের মধ্যে স্ফুলিংগের সৃষ্টি হবে। আর গ্যাসের অবস্থা যদি এই অঞ্চলের বাইরে থাকে, তাহলে স্ফুলিংগ উৎপন্ন হবে না। কত ন্যূনতম বিভব প্রভেদে স্ফুলিংগ পাওয়া যেতে পারে তা নির্ধারিত হয় এই লেখচিত্রের নিম্নতম বিন্দুর দ্বারা। খুব উচ্চ বা নিম্ন চাপে পাশেনের সূত্র কার্যকরী হয় না।

## 1. 11: মোক্ষণের প্রকৃতি

যখন দুটি তড়িৎদ্বারের মধ্যে বিভব প্রভেদ খুব বাড়ান হয় তখন তাদের মধ্যস্থিত গ্যাসের ভিতর দিয়ে দীপ্তিমান তড়িৎ-মোক্ষণ হয়। প্রমাণ (Standard) বায়বীয় চাপে বাতাসের মধ্যে এই মোক্ষণ ক্ষণস্থায়ী উজ্জ্বল প্রভার আকার ধারণ করে। সংগে সংগে তীক্ষ্ম চটপটি ফাটার মত বা বিষ্ফোরণের মত শব্দ শোনা যায়। একেই বলা হয় স্ফুলিংগ

মোক্ষণ (Spark Discharge)। সাধারণতঃ যখন তড়িৎদ্বার দুটির ব্যবধান তাদের আকার বা ব্যাসের তুলনায় ছোট হয় এবং প্রবাহ মাত্রা বহিস্থ রোধের সাহায্যে নিম্নমানে রাখা হয় তখন এক তড়িৎদ্বার থেকে অন্যটি পর্যন্ত বিস্তৃত এই জাতীয় স্ফুলিংগ দেখা যায়। এই প্রকার মোক্ষণ সরু আঁকাবাঁকা পথ ধরে চলে। এইরূপ স্ফুলিংগ ক্ষণস্থায়ী হয়। গ্যাসের মধ্যে বার বার যে বিভিন্ন স্ফুলিংগগুলি উৎপন্ন হয়, তারা বিভিন্ন পথ ধরে চলে।

যদি দুটি তড়িৎদ্বারের ব্যবধানের তুলনায় তাদের একটির ব্যাস ছোট হয়, তাহলে স্ফুলিংগ মোক্ষণ সৃষ্টি হবার আগে অপেক্ষাকৃত কম বিভবে আর এক প্রকার মোক্ষণ দেখা যায়। এক্ষেত্রে বুরুশ বা গাছের শাখা-প্রশাখার আকৃতি বিশিষ্ট এক প্রকার দীপ্তিমান মোক্ষণ (Luminous Discharge) ক্ষুদ্র ব্যাস বিশিষ্ট তড়িৎদ্বার থেকে কিছুদূর পর্যন্ত বিস্তৃত হতে দেখা যায়। যদি তড়িৎদ্বারটি সূচল প্রান্ত বিশিষ্ট দণ্ডের আকৃতি সম্পন্ন হয়, তাহলে তার সূচল প্রান্ত থেকে বুরুশ বা শাখা-প্রশাখার আকৃতি বিশিষ্ট দীপ্তিমান তড়িৎ-মোক্ষণ দেখা যায়। একে বলে 'বুরুশ মোক্ষণ' (Brush Discharge)। যদি তড়িৎদ্বারটি একটি সরু তার হয়, তাহলে নির্দিষ্ট মান অপেক্ষা উচ্চতর বিভব প্রয়োগ করলে, তারটিকে বেষ্টন করে এক প্রকার দীপ্তিমান মোক্ষণ দেখা যায়; এর নাম 'করোনা মোক্ষণ' (Corona Discharge)। তড়িৎদ্বারটি ধনাত্মক হলে এই বেষ্টনী সাধারণতঃ অবিচ্ছিন্ন (Continuous) হয়। তড়িৎদ্বারটি ঋণাত্মক হলে বেষ্টনীটি বহু খণ্ডে বিভক্ত দেখা যায়। সূচল প্রান্তের কাছে বা সরু তারের কাছে তড়িৎক্ষেত্র খুব উচ্চ হওয়ার জন্য এই রকম হয়ে থাকে। বুরুশ বা করোনা মোক্ষণ যে বিভবে দেখা যায়, স্ফুলিংগ মোক্ষণ সাধরণতঃ তার চেয়ে অনেক উচ্চতর বিভবে দেখা যায়। কিন্তু তড়িৎদ্বার দুটির মধ্যের দূরত্ব তাদের আকারের তুলনায় খুব বেশী না হলে অনেক সময় করোনা শুরু হওয়ার সংগে সংগেই স্ফুলিংগের সৃষ্টি হয়। উচ্চ বিভব সম্পন্ন বৈদ্যুতিক শক্তির পরিবহণের ক্ষেত্রে করোনা মোক্ষণের গুরুত্ব খুব বেশী। সাধারণতঃ পরিবাহক তার থেকে এইরকম মোক্ষণের ফলে শক্তিক্ষয় হয়। এই শক্তিক্ষয় কমানর জন্য পরিবাহক তার ফাঁপা নলের আকৃতি বিশিষ্ট করা হয়, যাতে এর উপরি তলের ব্যাস খুব কম না হয়। দুটি তারের মধ্যের দূরত্বও যথেষ্ট বেশী রাখা হয়।

করোনা মোক্ষণের ব্যবহারিক প্রয়োগ করা হয় 'গাইগার-মুলার' সংখ্যায়ক (Geiger-Müller Counter) নামক এক প্রকার যন্ত্র নির্মাণের কাজে।

এই যন্ত্রের সাহায্যে উচ্চ শক্তি সম্পন্ন ইলেকট্রন, আয়ন প্রভৃতি কণিকা নির্দেশ করা (Detect) এবং এদের সংখ্যা গণনা করা সম্ভব। তেজস্ক্রিয়তা সম্পর্কিত গবেষণায় এই যন্ত্রের গুরুত্ব অপরিসীম। এদের কার্যপ্রণালী পরে পঞ্চদশ পরিচ্ছেদে আলোচিত হবে।

উচ্চ চাপে যখন উচ্চ প্রবাহ-ঘনত্ব (Current Density) বিশিষ্ট তড়িৎ-মোক্ষণের সৃষ্টি হয় তখন তাকে বলা হয় 'আর্ক-মোক্ষণ' (Arc Discharge)। সাধারণতঃ এক্ষেত্রে মোক্ষণের ফলে তড়িৎদ্বার দুটি উত্তপ্ত হয়ে যায়। তাদের মধ্যে বিভব প্রভেদও খুব কম থাকে। কার্বন, তামা প্রভৃতি দ্বারা নির্মিত তড়িৎদ্বার ব্যবহার করে বাতাসের মধ্য দিয়ে এই রকম মোক্ষণ সৃষ্টি করা যায়। আবার বায়ুমণ্ডলীয় চাপ সম্পন্ন পারদ বাষ্পের মধ্যেও আর্ক-মোক্ষণ সৃষ্টি করা যায়। এক্ষেত্রে তড়িৎদ্বার দুটির মধ্যবর্তী স্থানে যে দীপ্তিমান মোক্ষণ দেখা যায় তার প্রভা অতি উজ্জ্বল হয়। কার্বন-আর্ক চলচ্চিত্র প্রভৃতি ক্ষেত্রে আলোক-উৎস হিসাবে ব্যবহৃত হয়।

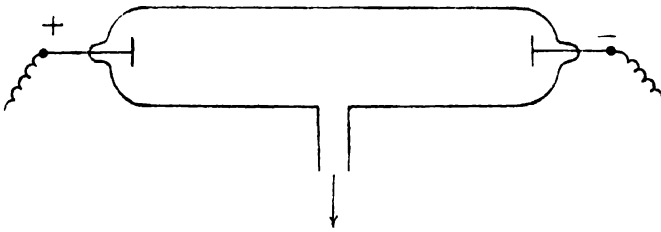
# পরিচ্ছেদ 2

## গ্যাসের মধ্যে তড়িৎ মোক্ষণ ; ক্যাথোড-রশ্মি ও ধনাত্মক রশ্মি

### 2.1: নিম্ন চাপে গ্যাসের মধ্যে তড়িৎ মোক্ষণ

প্রথম পরিচ্ছেদে দেখা গেছে যে যখন দুটি তড়িৎদ্বারের মধ্যে খুব উচ্চ বিভব প্রভেদ প্রয়োগ করা হয়, তখন তাদের মধ্যে স্ফুলিংগের সৃষ্টি হয়। বহিস্থ আয়নন উৎপাদক যদি উপস্থিত না থাকে তাহলেও এইরূপ স্ফুলিংগ দেখা যায়। গ্যাসের চাপ কমালে স্ফুলিংগ বিভব কম হয়। এই অবস্থায় যে দীপ্তিমান মোক্ষণ দেখা যায়, তার প্রকৃতি গ্যাসের চাপ পরিবর্তনের সংগে পরিবর্তিত হয়।

নিম্নে বর্ণিত পরীক্ষার সাহায্যে মোক্ষণের এই প্রকৃতি পরিবর্তন পর্যবেক্ষণ করা যায়। প্রায় 50 সেমি দীর্ঘ এবং 3 সেমি ব্যাস বিশিষ্ট একটি কাঁচ নলের দুই প্রান্তে দুটি চাকতির আকৃতি বিশিষ্ট ধাতব তড়িৎদ্বার সীল (Seal) করে বসান থাকে। একটি পার্শ্বনলের সাহায্যে নলের ভিতরকার গ্যাসের চাপ পাম্পের দ্বারা ইচ্ছামত কমান যায় (2·1

চিত্র 2.1

নিম্নচাপে গ্যাসের মধ্যে তড়িৎ মোক্ষণ পর্যবেক্ষণ ব্যবস্থা।

চিত্র দ্রষ্টব্য)। তড়িৎদ্বার দুটিকে একটি আবেশ কুণ্ডলী যন্ত্রের (Induction Coil) অন্তর্গত আবিষ্ট কুণ্ডলীর (Secondary Coil) দুই প্রান্তের সংগে বাইরে থেকে সংযুক্ত করে তাদের মধ্যে কয়েক সহস্র ভোল্ট বিভব প্রভেদ প্রয়োগ করা হয়।

নলের ভিতরের চাপ যখন এক সেন্টিমিটার (Hg) অপেক্ষা কম হয়, তখন নলের মধ্যে এক তড়িৎদ্বার থেকে অন্য তড়িৎদ্বার পর্যন্ত বিস্তৃত

চিত্র 2.2

বিভিন্ন চাপে মোক্ষণের প্রকৃতি।

স্ফুলিংগ (Spark) সৃষ্ট হতে দেখা যায়। সংগে সংগে চটপটি ফাটার মত তীক্ষ্ন শব্দও শোনা যায়। এইরূপ ক্ষণস্থায়ী স্ফুলিংগ-মোক্ষণ বারবার হতে থাকে। চাপ আরও কমিয়ে প্রায় 0·5 মিমি (Hg) করলে মোক্ষণ স্থায়ী ভাবে চলতে থাকে এবং শব্দের প্রকৃতিও পরিবর্তিত হয়। এই সময় গুঞ্জনের (Buzzing) মত শব্দ শোনা যায়। নলের মধ্যের অবশিষ্ট বাতাসে রক্তিমাভ বেগনী রঙের দীপ্তিমান মোক্ষণ (Luminous Discharge) পাশ্ব-বিস্তৃত হয়ে ক্যাথোড এবং অ্যানোডের মধ্যেকার প্রায় সমগ্র স্থানটি পরিপূর্ণ করে ফেলে। এই দীপ্তিমান আলোকস্তম্ভকে বলা হয় 'ধনাত্মক স্তম্ভ' (Positive Column)। ক্যাথোডের কাছাকাছি স্বল্প পরিসর স্থানে এই দীপ্তি দেখা যায় না। আলোকহীন স্থানটিকে 'ফ্যারাডে অন্ধকার অঞ্চল' (Faraday Dark Space) বলা হয়। ক্যাথোডের গাত্র সংলগ্ন আর একটি খুব স্বল্প পরিসর দীপ্ত স্থান দেখা যায়। একে বলা হয় 'ঋণাত্মক দীপ্তি' (Negative Glow)। ঋণাত্মক ও ধনাত্মক স্তম্ভের মধ্যে থাকে 'ফ্যারাডে অন্ধকার অঞ্চল'।

এর পর নলের মধ্যের গ্যাসের চাপ যদি কমান যায় তা হলে ঋণাত্মক দীপ্তি ক্যাথোডের তল থেকে বিচ্ছিন্ন হয়ে অ্যানোডের দিকে সরে যায় এবং ক্যাথোড ও অ্যানোডের মাঝখানে আর একটি অন্ধকার অঞ্চল সৃষ্ট হয়, যার নাম 'ক্রুকস্ অন্ধকার অঞ্চল' (Crooke's Dark Space)। এই অবস্থায় ক্যাথোড সংলগ্ন দীপ্ত স্থানকে বলা হয় 'ক্যাথোড দীপ্তি' (Cathode Glow)। এই সব পরিবর্তনের সংগে সংগে বিভিন্ন দীপ্তি-মান স্থানে বর্ণ পরিবর্তন হয়।

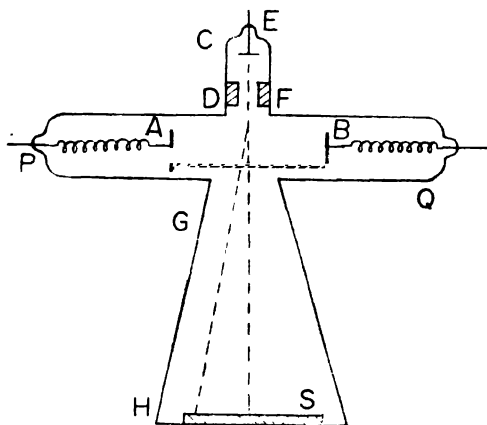
চাপ 0·1 মিমি (Hg) অপেক্ষা যদি কম হয়, তা হলে ধনাত্মক স্তম্ভটি স্বল্প পরিসর কতকগুলি দীপ্তিমান স্তরে বিভক্ত হয়ে যায়। এদের মধ্য-বর্তী অঞ্চলগুলি আলোকহীন হয়। সমস্ত ধনাত্মক স্তম্ভটির মধ্যে কতক-গুলি ডোরা (Striations) কাটা আছে বলে মনে হয়। (২·২) চিত্রে বিভিন্ন চাপে নলের ভিতরকার মোক্ষণের প্রকৃতি কী রকম হয় তা দেখান হয়েছে।

গ্যাসের চাপ যদি আরও কমান যায় ($p < 0·1$ মিমি Hg), তাহলে ক্রুক্স্ অন্ধকার অঞ্চল ক্রমশঃ বিস্তৃত হয়ে সমগ্র নলটি পূর্ণ করে ফেলে। তখন গ্যাসের মধ্যে দীপ্তি আর দেখা যায় না। এই সময় অ্যানোড ও ক্যাথোডের মধ্যবর্তী স্থানের বৈদ্যুতিক-রোধ খুব বেশী হয়ে যায় এবং নলের মধ্য দিয়ে তড়িৎ-মোক্ষণ খুব কষ্টসাধ্য হয়। এই অবস্থায় কাঁচ নলের দেহ থেকে এক প্রকার নীলাভ বা সবুজাভ মৃদু প্রতিপ্রভ দীপ্তি

নির্গত হতে দেখা যায়। যন্ত্র সহকারে পর্যবেক্ষণ করে দেখা গিয়েছে যে এই সময়ে ক্যাথোড থেকে এক প্রকার দ্রুতগতি আহিত কণিকা নির্গত হয়ে অ্যানোডের উপরে এবং কাঁচনলের ভিতরের গাত্রে আপতিত হয়। এই সংঘাতের ফলে কাঁচনলের দেহ থেকে নীলাভ বা সবুজাভ প্রতিপ্রভ বিকিরণ (Fluorescent Radiation) নির্গত হয়। ক্যাথোড থেকে নির্গত এই কণিকাকে 'ক্যাথোড রশ্মি' (Cathode Rays) নামে অভিহিত করা হয়।

## 2. 2: মোক্ষণ নলের মধ্যে সৃষ্ট ঘটনাবলীর কারণ ব্যাখ্যা

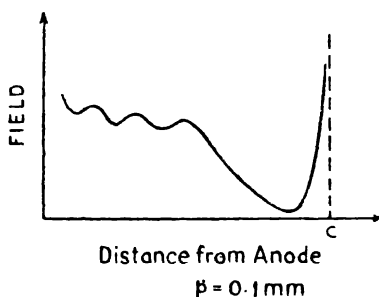
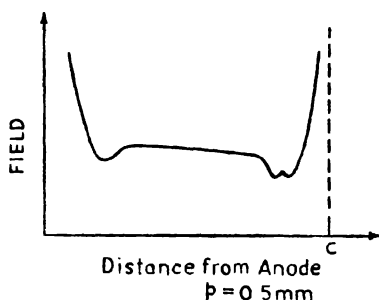
মোক্ষণ নলের মধ্যে বিভিন্ন চাপে বিভিন্ন প্রকৃতির মোক্ষণের উৎপত্তির কারণ ব্যাখ্যা করতে হলে প্রথমে নলের ভিতরে অ্যানোড ও ক্যাথোডের মধ্যবর্তী স্থানে বিভবের বিস্তার (Potential Distribution) কী রকম হয় তা জানা প্রয়োজন। (২·3) চিত্রে প্রদর্শিত পরীক্ষা ব্যবস্থার দ্বারা প্রখ্যাত বৃটিশ বিজ্ঞানী টমসন (J. J. Thomson) এই বিভব

চিত্র ২.3

মোক্ষণ নলের মধ্যে তড়িৎক্ষেত্র বিস্তৃতি পরিমাপের জন্য টমসন উদ্ভাবিত পরীক্ষা ব্যবস্থা।

বিস্তার নির্ণয় করেন। EF হচ্ছে নিম্ন বায়ুচাপ সম্পন্ন একটি ক্ষুদ্র মোক্ষণ নল। এই নল মধ্যস্থ ক্যাথোড C থেকে নির্গত ক্যাথোড রশ্মি

D অ্যানোডের মধ্যেকার একটি খুব সূক্ষ্ম ছিদ্র পার হয়ে মূল মোক্ষণ নল PQ এর মধ্যে প্রবেশ করে। মোক্ষণ নল দুটি পরস্পরের সংগে লম্ব-ভাবে যুক্ত থাকে। PQ নলের মধ্যে অবস্থিত A ও B দুটি তড়িৎদ্বারকে তাদের মধ্যের ব্যবধান এবং নলের ভিতরের চাপ অপরিবর্তিত রেখে বাম দিক থেকে ডান দিকে বা ডান দিক থেকে বাম দিকে সরান যায়। A ও B তড়িৎদ্বার দুটির মধ্যবর্তী স্থানের গ্যাসের চাপ পাম্পের সাহায্যে পরিবর্তন করা যায় এবং এদের মধ্যে উচ্চ বিভব প্রভেদ প্রয়োগ করা হয়। EF নলের বিপরীত দিকে PQ নলের সংগে আর একটি প্রশস্ত নল GH যুক্ত থাকে, যার অপর প্রান্তে একটি প্রতিপ্রভ পর্দা (Fluorescent Screen) S রাখা থাকে। A ও B তড়িৎদ্বারদ্বয়ের মধ্যে কোন বিভব প্রভেদ প্রযুক্ত না হলে D অ্যানোডের ছিদ্র দিয়ে নির্গত ক্যাথোড রশ্মি S পর্দার মধ্যস্থলে আপতিত হয়ে একটি উজ্জ্বল প্রতিপ্রভ আলোক বিন্দুর সৃষ্টি করে। এখন A ও B তড়িৎদ্বার দুটির মধ্যে যদি উচ্চ বিভব প্রভেদ প্রয়োগ করা হয়, তাহলে ঋণাত্মক আধানবাহী ক্যাথোড রশ্মিগুলিকে তাদের মধ্যেকার তড়িৎক্ষেত্র পার হয়ে যেতে হয়। এই তড়িৎক্ষেত্রের প্রভাবে এরা গন্তব্য পথ থেকে বিচ্যুত হয়ে S পর্দার উপরে অন্যত্র আপতিত হয়। প্রতিপ্রভ বিন্দুটির বিচ্যুতি থেকে A ও B তড়িৎদ্বারদ্বয়ের মধ্যে যেখান দিয়ে ক্যাথোড রশ্মিগুলি চলে যায় সেই স্থানের তড়িৎক্ষেত্র-প্রাবল্য (Intensity) নির্ণয় করা যায়। এখন A ও B তড়িৎদ্বার দুটিকে তাদের মধ্যেকার ব্যবধান অপরিবর্তিত রেখে ক্রমশঃ সরিয়ে নিয়ে গেলে, উপরে বর্ণিত পদ্ধতিতে তাদের মধ্যে বিভিন্ন স্থানে তড়িৎক্ষেত্র-প্রাবল্য নির্ণয় করা যেতে পারে। (2·4) চিত্রে দুটি তড়িৎদ্বারের মধ্যে দুই বিভিন্ন চাপে $E$ তড়িৎক্ষেত্রের বিস্তৃতি দেখান হয়েছে। (2·4) চিত্র থেকে দেখা যায় যে নলের ভিতর 0·5 মিমি (Hg) অপেক্ষা নিম্নতর চাপে, বিভব পরিবর্তন প্রধানতঃ C ক্যাথোডের নিকটবর্তী ক্রুক্স্ অন্ধকার অঞ্চলে ঘটে থাকে। এই পরিবর্তনকে ক্যাথোড-পাত (Cathode Fall) বলা হয়। নির্দিষ্ট গ্যাস ও নির্দিষ্ট ধাতুর তৈয়ারী তড়িৎদ্বার ব্যবহার করলে ক্যাথোড-পাত সাধারণতঃ ধ্রুবক হয়। মোক্ষণ চালু রাখার জন্য এই অঞ্চলই সর্বাপেক্ষা গুরুত্বপূর্ণ।

ক্রুকস্ অন্ধকার অঞ্চল থেকে অ্যানোডের দিকে এগিয়ে গেলে, বিভব খুব ধীরে ধীরে পরিবর্তিত হয়। যেহেতু ক্ষেত্র-প্রাবল্যের মান দূরত্বের সঙ্গে বিভব পরিবর্তনের হারের উপর নির্ভর করে, অতএব ক্রুক্স্ অন্ধকার অঞ্চলে ক্ষেত্র-প্রাবল্য $E$ প্রথমে খুব উচ্চ মানে থাকে, পরে দ্রুত কমে যায়। যত

চিত্র 2.4

মোক্ষণ নলের মধ্যে তড়িৎক্ষেত্র বিস্তৃতির লেখচিত্র।

অ্যানোডের দিকে এগিয়ে যাওয়া যায় $E$ তত কমে যায় এবং অবশেষে প্রায় ধ্রুবক হয়ে যায়।

নিম্নতর চাপে যখন ধনাত্মক স্তম্ভের মধ্যে ডোরার (Striations) আবির্ভাব হয়, তখনও বিভবের পরিবর্তন প্রধানতঃ ক্রুকস্ অন্ধকার অঞ্চলে ঘটে থাকে (2·4 চিত্র দ্রষ্টব্য)। কিন্তু এক্ষেত্রে অ্যানোডের দিকে এগিয়ে চলে গেলে, ডোরা কাটা অঞ্চলে বিভবের মান কিছু দূর অন্তর উচ্চ-নীচ হতে থাকে, যদিও এই পরিবর্তনের মাত্রা কম হয়। ক্ষেত্র-প্রাবল্য আগের মতই ক্রুকস্ অন্ধকার অঞ্চলে প্রথমে উচ্চ হয়, পরে দ্রুত কমে যায়। ডোরা-কাটা অঞ্চলে ক্ষেত্র-প্রাবল্যের মান পর্যায়ক্রমে উচ্চ-নীচ হতে থাকে।

মোক্ষণ নলের মধ্যে বিভব পরিবর্তনের প্রকৃতি থেকে দীপ্তিমান মোক্ষণ কীভাবে চলতে থাকে তা বোঝা সম্ভব। ক্যাথোড থেকে নিঃসৃত ইলেকট্রন কর্তৃক সংঘাতের দ্বারা আয়ন সৃষ্টিই (Ionization by Collision) মূলতঃ এই ধরণের মোক্ষণ চালিত রাখার জন্য দায়ী। ক্যাথোড সংলগ্ন অল্প পরিসর স্থান অতিক্রম করার সময়ে অপেক্ষাকৃত উচ্চ বিভব পরিবর্তনের

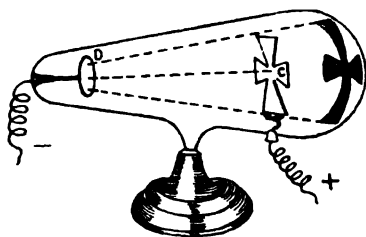
জন্য ইলেকট্রনগুলি প্রচুর শক্তি অর্জন করে। ফলে গ্যাস অণুর সঙ্গে সংঘাত প্রাপ্ত হলে তারা আয়ন-যুগল সৃষ্টি করতে পারে। এইভাবে সৃষ্ট আয়নের মধ্যে ধনাত্মক আয়নগুলি ক্যাথোডের উপর আপতিত হয়ে নূতন করে ইলেকট্রন নিঃসৃত করে। মোক্ষণ চালিত রাখতে হলে প্রতিটি ধনাত্মক আয়নের জন্য ক্যাথোড থেকে এইভাবে অন্ততঃ একটি করে নূতন ইলেকট্রন নির্গত হওয়া প্রয়োজন।

বিভিন্ন প্রক্রিয়ায় উৎপন্ন উভয় প্রকার আয়নের মধ্যে ইলেকট্রনগুলি অধিকতর গতিশীলতার (Mobility) জন্য ক্যাথোড থেকে দ্রুত সরে আসে। গুরুভার ধনাত্মক আয়নগুলি এত তাড়াতাড়ি বেশী দূর এগিয়ে যেতে পারে না এবং ক্যাথোডের ঠিক সামনে একটি ধনাত্মক আয়নের স্তর সৃষ্টি করে। ফলে ঋণাত্মক ক্যাথোড ও তার অল্প দূরে অবস্থিত ধনাত্মক আয়নস্তরের মধ্যে সমধিক বিভব পরিবর্তন হয়ে থাকে এবং এই অঞ্চলে ক্ষেত্র-প্রাবল্যের মান খুব উচ্চ হয়। এইরূপ উচ্চ তড়িৎক্ষেত্রের মধ্যে শক্তি অর্জন করে ইলেকট্রনগুলি ক্রুক্স্ অন্ধকার অঞ্চল পেরিয়ে এসে গ্যাস অণু-সমূহকে সংঘাতের দ্বারা আয়নিত অথবা উত্তেজিত (Excited) করে এবং নিজেরা শক্তিহীন হয়ে পড়ে। উত্তেজিত অণুগুলি আবার যখন তাদের স্বাভাবিক অবস্থায় ফিরে আসে তখন তাদের মধ্য থেকে আলোক নিঃসৃত হয় (3·5 অনুচ্ছেদ দ্রষ্টব্য)। এই কারণেই ঋণাত্মক দীপ্তির সৃষ্টি হয়। ক্রুক্স্ অন্ধকার অঞ্চলের বিস্তৃতি স্পষ্টতঃ ইলেকট্রনগুলির গড় মুক্তপথের (Mean Free Path) প্রায় সমান হয়। ক্রুক্স অন্ধকার অঞ্চল পার হবার পর শক্তিহীন ইলেকট্রনগুলি অ্যানোডের দিকে আরও অগ্রসর হবার সঙ্গে সঙ্গে নূতন করে শক্তি অর্জন করে। ফ্যারাডে অন্ধকার অঞ্চল এইভাবে পার হয়ে যাবার পর ইলেকট্রনগুলি আবার যথেষ্ট শক্তি অর্জন করে; পুনরায় গ্যাস অণুগুলির সঙ্গে সংঘাতের ফলে তারা সেগুলিকে পূর্বের মত আয়নিত বা উত্তেজিত করে এবং নিজেরা শক্তিহীন হয়ে পড়ে। উত্তেজিত অণুগুলি থেকে আবার পূর্বের মত আলোক নিঃসৃত হয়। এইভাবে ধনাত্মক স্তম্ভ (Positive Column) সৃষ্ট হয়। ধনাত্মক স্তম্ভের মধ্য দিয়ে যাবার সময় ইলেকট্রনগুলি সংঘাতের ফলে কিছুদূর পরপর তাদের শক্তি হারায় এবং আবার নূতন করে শক্তি অর্জন করে। যে সব অঞ্চলে তারা সংঘাতের দ্বারা অণুগুলিকে উত্তেজিত বা আয়নিত করে শক্তি হারায় সেই অঞ্চলগুলিকে আলোকিত দেখায়; পার্শ্ববর্তী যে সব অঞ্চলে তারা শক্তি অর্জন করে সেই অঞ্চলগুলি আলোকহীন হয়। এইভাবে ধনাত্মক দীপ্তির মধ্যে ডোরার (Striations) সৃষ্টি হয়।

## 2.3: ক্যাথোড রশ্মি

আমরা আগেই দেখেছি যে যখন মোক্ষণ নলের মধ্যে চাপ খুব কম করা হয় ($p<0 \cdot 1$ মিমি), তখন ক্রুক্‌স্‌ অন্ধকার অঞ্চল সমস্ত নলটিকে পরিব্যাপ্ত করে এবং এই অবস্থায় ক্যাথোড থেকে এক প্রকার দ্রুতগতি আহিত কণিকা নির্গত হতে থাকে, যাদের বলা হয় ক্যাথোড রশ্মি (Cathode Rays)।

ক্যাথোড রশ্মি নিয়ে বিশদভাবে গবেষণা করেন টমসন (J.J. Thomson)। তিনি দেখান যে এরা ক্যাথোড থেকে নির্গত হয়ে সরলরেখা পথে পরিভ্রমণ করে। যদি একটি কাঁচ নির্মিত মোক্ষণ নলের মধ্যে ক্যাথোডের বিপরীত দিকে একটি প্রতিবন্ধক রাখা থাকে, তাহলে মোক্ষণ নলের গাত্রে প্রতিবন্ধকটির একটি ছায়া সৃষ্ট হয় (২·5 চিত্র দ্রষ্টব্য)। এর থেকে প্রমাণিত

চিত্র ২.5

ক্যাথোড রশ্মির সরলরেখা গতি প্রমাণের যন্ত্র। D ক্যাথোড থেকে নিঃসৃত ক্যাথোড রশ্মির গতিপথে স্থাপিত C প্রতিবন্ধকের ছায়া বিপরীত দিকের কাঁচগাত্রে উৎপন্ন হয়েছে।

হয় যে ক্যাথোড রশ্মিগুলি সরলরেখা পথে পরিভ্রমণ করে। যদি অবতল (Concave) ক্যাথোড ব্যবহার করা হয়, তাহলে ক্যাথোড রশ্মিগুলি একটি ফোকাস-বিন্দুতে গিয়ে মিলিত হয়। এই ফোকাস-বিন্দুতে যদি ছোট এক টুকরা পাতলা প্ল্যাটিনামের পাত রাখা হয় তাহলে ক্যাথোড রশ্মির আঘাতের ফলে টুকরাটি উত্তপ্ত হয়ে অবশেষে প্রদীপ্ত হয়ে ওঠে। এর থেকে প্রমাণিত হয় যে ক্যাথোড রশ্মিগুলি ক্যাথোডতলের অভিলম্বে নির্গত হয়, এবং এরা খুব উচ্চ শক্তি সম্পন্ন হয়। এদের গতিশক্তিই তাপশক্তিতে রূপান্তরিত হয়ে প্ল্যাটিনামের পাতটিকে উত্তপ্ত করে।

ক্যাথোড রশ্মির উপর তড়িৎক্ষেত্র ও চৌম্বক ক্ষেত্রের ক্রিয়া পর্যবেক্ষণ

করলে দেখা যায় যে উভয় প্রকার ক্ষেত্রের প্রভাবেই ক্যাথোড রশ্মিগুলি তাদের ভ্রমণপথ থেকে বিচ্যুত হয়। এর থেকে প্রমাণিত হয় যে এগুলি এক প্রকার আহিত কণিকা। তড়িৎক্ষেত্র এবং চৌম্বক ক্ষেত্রের প্রভাবে এদের বিচ্যুতির দিক লক্ষ্য করলে বোঝা যায় যে এগুলি ঋণাত্মক আহিত কণিকা।

ক্যাথোড রশ্মিগুলি বিশেষ বিশেষ কতকগুলি দ্রব্যের উপর আপতিত হয়ে প্রতিপ্রভ (Fluorescent) দীপ্তির সৃষ্টি করে, যেমন বেরিয়াম প্ল্যাটিনো সায়ানাইড, দস্তার সালফাইড (ZnS) প্রভৃতি। বিশেষ ধরণের কাঁচ থেকেও এদের প্রভাবে প্রতিপ্রভ বিকিরণ নির্গত হয়। পূর্বেই উল্লেখ করা হয়েছে যে এই জন্যই মোক্ষণ নলের কাঁচ গাত্র থেকে নীলাভ বা সবুজাভ দীপ্তি নির্গত হয়।

ক্যাথোড রশ্মি কোন বস্তুর উপর আপতিত হলে, তার উপর চাপের সৃষ্টি হয়। (২·6) চিত্রে ক্যাথোড রশ্মির এইরূপ চাপ সৃষ্টি ক্ষমতা

চিত্র 2.6

ক্যাথোড রশ্মির চাপ সৃষ্টি ক্ষমতা পর্যবেক্ষণের যন্ত্র।

প্রদর্শনের জন্য একটি যন্ত্র দেখান হয়েছে। একটি কাঁচ নলের মধ্যে ছোট একটি চাকা থাকে যার সংগে কতকগুলি হালকা অভ্র ফলক সংলগ্ন থাকে। চাকার অক্ষটি এক জোড়া সমান্তরাল কাঁচের রেলের (Rail) উপর দিয়ে নলের এক প্রান্ত থেকে অন্য প্রান্ত পর্যন্ত গড়িয়ে যেতে পারে। নলের মধ্যে গ্যাসের চাপ খুব নিম্নমানে রাখা হয়, যাতে এর মধ্যে অবস্থিত ক্যাথোড থেকে বিভব প্রভেদের প্রভাবে ক্যাথোড রশ্মি নির্গত হতে পারে। নলটিকে এমন ভাবে স্থাপিত করা হয় যে এর ভিতরকার রেল দুটি অনুভূমিক (Horizontal) ভাবে থাকে। ক্যাথোড থেকে নির্গত ক্যাথোড রশ্মি অভ্র ফলকের উপর আপতিত হলে চাকাটি আবর্তনরত অবস্থায় ক্যাথোড থেকে অ্যানোডের দিকে অগ্রসর হয়। টমসন দেখান যে চাকাটির এই আবর্তনের জন্য শুধু অভ্র ফলকের উপর ক্যাথোড রশ্মির আঘাত জনিত যান্ত্রিক চাপই দায়ী নয়, কারণ এই চাপ

পরিমাণে যথেষ্ট হয় না। খুব সম্ভবতঃ এই আঘাতের ফলে ফলকগুলির আহত পৃষ্ঠ অন্য পৃষ্ঠ অপেক্ষা বেশী উত্তপ্ত হয়ে যায়। নলের মধ্যে বর্তমান গ্যাস অণুগুলি উষ্ণতর পৃষ্ঠের উপর সংঘাতের ফলে অন্য পৃষ্ঠের তুলনায় উচ্চতর চাপ উৎপন্ন করে। ফলে চাকাটি আবর্তিত হতে থাকে। অর্থাৎ এই ক্রিয়া ক্রুক্‌স্‌ কর্তৃক আবিষ্কৃত রেডিয়োমিটার (Radiometer) ক্রিয়ার অনুরূপ।

উপরে আলোচিত ক্যাথোড রশ্মির বিভিন্ন ধর্মাবলী থেকে প্রতীয়মান হয় যে এই রশ্মিগুলি এক প্রকার দ্রুতগতি ঋণাত্মক আধানবাহী কণিকা-গুচ্ছ। কাঁচনলের ভিতরে দুই তড়িৎদ্বারের মধ্যেকার উচ্চ বিভব প্রভেদের জন্য এরা ক্যাথোড থেকে নির্গত হয়ে অ্যানোডের দিকে যাবার পথে প্রচুর শক্তি অর্জন করে। ফলে এরা খুব দ্রুত বেগে নলের মধ্যে ভ্রমণ করে। নানাবিধ পরীক্ষার ফলে দেখা যায় যে মোক্ষণ নলে যে কোন প্রকার গ্যাসই থাকুক না কেন, ক্যাথোড থেকে নির্গত এই ঋণাত্মক কণিকা-গুলির ধর্মাবলী সব ক্ষেত্রেই এক রকম হয়। এর থেকে প্রতীয়মান হয় যে এই কণিকাগুলি সকল পদার্থের একটি সার্বিক উপাদান। স্টোনী (Johnston Stoney) নামক বিজ্ঞানী তড়িৎ বিশ্লেষণ (Electrolysis) সম্পর্কিত পরীক্ষা থেকে সিদ্ধান্ত করেন যে তড়িৎ বিশ্লেষণের মূলে আছে এক প্রকার অবিভাজ্য তাড়িত কণিকা, যার নাম তিনি দেন 'ইলেকট্রন'। পরবর্তী যুগে প্রতীয়মান হয় যে ক্যাথোড রশ্মিগুলি হচ্ছে প্রকৃতপক্ষে দ্রুতগতি ইলেকট্রনগুচ্ছ।

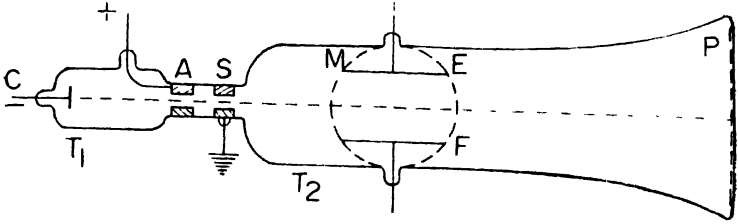
যেহেতু সকল বস্তুই ক্ষুদ্র ক্ষুদ্র পরমাণুর দ্বারা গঠিত, এবং ইলেকট্রন-গুলি হচ্ছে সকল বস্তুর সার্বিক উপাদান, অতএব ধরা যেতে পারে যে সব রকম পরমাণুর মধ্যেই ইলেকট্রন থাকে। আবার সব পরমাণুর মধ্যেই মোট আধানের পরিমাণ শূন্য হয়। যেহেতু তাদের মধ্যে কিছু সংখ্যক ঋণাত্মক আহিত ইলেকট্রন বর্তমান থাকে, অতএব মনে করা যেতে পারে যে সব পরমাণুর মধ্যেই দুটি অংশ থাকে, একটি ঋণাত্মক আধানবাহী ও অন্যটি ধনাত্মক আধানবাহী।

## 2. 4: ক্যাথোড রশ্মির আপেক্ষিক আধান নিরূপণ; টমসনের পরীক্ষা

ক্যাথোড রশ্মির স্বরূপ নির্ণয় করতে হলে তাদের ভর $(m)$ ও আধান $(e)$ পরিমাপ করা প্রয়োজন। নানাবিধ পরীক্ষার দ্বারা এদের আধান ও ভরের অনুপাত $(e/m)$ সঠিক ভাবে পরিমাপ করা সম্ভব। এই অনু-পাতকে বলা হয় আপেক্ষিক আধান (Specific Charge)। পরে যদি

কণিকাগুলির আধান ($e$) স্বতন্ত্রভাবে পরিমাপ করা যায়, তাহলে আপেক্ষিক আধান থেকে এদের ভর ($m$) নিরূপণ করা সম্ভব।

টমসন (J.J. Thomson) সর্বপ্রথম নিম্নে বর্ণিত পদ্ধতিতে ক্যাথোড রশ্মির ($e/m$) নিরূপণ করেন। (2·7) চিত্রে $T_1$ একটি ছোট মোক্ষণ নল

চিত্র 2.7

ক্যাথোড রশ্মির আপেক্ষিক আধান নির্ণয়ের জন্য টমসনের পরীক্ষা ব্যবস্থা।

যার মধ্যে ক্যাথোড রশ্মি উৎপাদন করা হয়। নলের মধ্যে গ্যাসের চাপ খুব কম থাকে। C ক্যাথোড ও A অ্যানোডের মধ্যে উচ্চ বিভব প্রভেদ প্রয়োগের ফলে ক্যাথোড থেকে নিঃসৃত ক্যাথোড রশ্মি অ্যানোড এবং তার পিছনে অবস্থিত S ধাতব চাকতির মধ্যেকার সূক্ষ্ম ছিদ্র পার হয়ে সমান্তরিত (Collimated) হয়। এই সমান্তরিত রশ্মিগুচ্ছ পরে অপেক্ষাকৃত প্রশস্ত এবং খুব নিম্ন বায়ুচাপ সম্পন্ন $T_2$ কাঁচনলের ভিতর প্রবেশ করে। এর মধ্যে রাখা E, F দুটি সমান্তরাল ধাতব প্লেটের মধ্যবর্তী অঞ্চল দিয়ে এই রশ্মিগুচ্ছকে পাঠান হয়। প্লেট দুটির মধ্যে বিভব প্রভেদ প্রয়োগের দ্বারা রশ্মিগুচ্ছের প্রাথমিক ভ্রমণপথের অভিলম্বে একটি তড়িৎক্ষেত্র উৎপন্ন করা যায়, যার প্রভাবে ক্যাথোড রশ্মিগুচ্ছ তাদের সরলরেখা ভ্রমণপথ থেকে তড়িৎক্ষেত্র অভিমুখে বিচ্যুত হয়ে যায়। এই একই অঞ্চলে একটি অশ্বক্ষুর চুম্বকের (M) সাহায্যে তড়িৎক্ষেত্রের অভিলম্বে প্রয়োজন মত চৌম্বক ক্ষেত্র প্রয়োগ করার ব্যবস্থা থাকে। (2·7) চিত্রে এই চৌম্বক ক্ষেত্র পুস্তকের পাতার অভিলম্বে ক্রিয়া করে। এই চৌম্বক ক্ষেত্রের জন্যও ক্যাথোড রশ্মিগুচ্ছের উপর একটি বল ক্রিয়া করে। ক্যাথোড রশ্মির গতিপথ ও চৌম্বক ক্ষেত্রের অভিমুখ, উভয়ের সংগে লম্বভাবে এই বল ক্রিয়া করে। চৌম্বক ক্ষেত্রের দিক ইচ্ছামত নির্দিষ্ট করে এই বলকে তড়িৎক্ষেত্রজ বলের ঠিক বিপরীত দিকে ক্রিয়া করান সম্ভব।

তড়িৎক্ষেত্র ও চৌম্বক ক্ষেত্র থেকে নির্গত হয়ে ক্যাথোড রশ্মিগুচ্ছ নলের অপর প্রান্তে রাখা $P$ প্রতিপ্রভ পর্দার (Fluorescent Screen) উপর আপতিত হয়ে একটি দীপ্ত বিন্দুর সৃষ্টি করে। তড়িৎক্ষেত্র ও চৌম্বক ক্ষেত্রের ক্রিয়ার ফলে এই বিন্দুটির অবস্থান পরিবর্তিত হয় এবং বিন্দুটির প্রাথমিক অবিচ্যুত অবস্থান থেকে এর সরণ (Displacement) সহজেই মাপা সম্ভব।

ক্যাথোড রশ্মি কণিকাগুলির আধান ও ভর যথাক্রমে $e$ ও $m$ ধরা যাক। $H$ চৌম্বক ক্ষেত্রের প্রভাবে $v$ বেগে বিচরণশীল এইরূপ একটি কণিকার উপরে প্রযুক্ত বল হয়

$$F_m = \frac{Hev}{c} \tag{2.1}$$

আবার $X$ তড়িৎক্ষেত্রের জন্য ক্যাথোড রশ্মি কণিকাগুলির উপরে ক্রিয়াশীল বল হয়

$$F_e = Xe \tag{2.2}$$

(2·1) এবং (2·2) সমীকরণে $X$ ও $e$ স্থির-তড়িৎ এককে (e.s.u.) এবং $H$ তড়িৎ-চুম্বকীয় এককে (e.m.u.) পরিমাপ করা হয়।

যদি শুধু চৌম্বক ক্ষেত্রই ক্রিয়া করে তাহলে প্রতিপ্রভ পর্দার উপরের দীপ্ত বিন্দুটি প্রাথমিক অবস্থান থেকে কিছুদূরে সরে যায়। এখন যদি একই সংগে তড়িৎক্ষেত্রও প্রয়োগ করা হয় এবং এর মান ও দিক এমন ভাবে নির্দিষ্ট করা হয় যে প্রতিপ্রভ পর্দার উপর দীপ্ত বিন্দুটি তার প্রাথমিক অবস্থানে ফিরে আসে তাহলে ক্যাথোড রশ্মিগুলির উপর চৌম্বক ক্ষেত্র এবং তড়িৎক্ষেত্রের জন্য প্রযুক্ত বল পরস্পরের সমান এবং বিপরীতমুখী হবে বলে ধরা যেতে পারে। তড়িৎক্ষেত্রের যে মান হলে এই রকম ঘটবে তাকে যদি $X_0$ দ্বারা নির্দেশ করা হয়, তাহলে আমরা লিখতে পারি

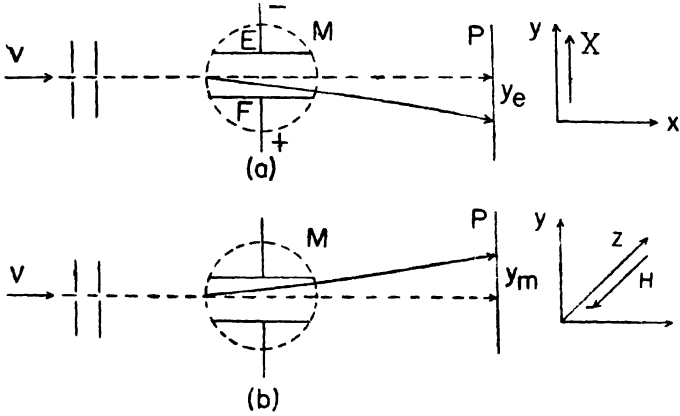
$$X_0 e = \frac{Hev}{c} \tag{2.3}$$

সমীকরণ (2·3) থেকে ক্যাথোড রশ্মির বেগ পাওয়া যায়

$$v = cX_0/H \tag{2.4}$$

বেগ নির্ণীত হবার পর হয় শুধু চৌম্বক ক্ষেত্রের জন্য নয় শুধু তড়িৎ-ক্ষেত্রের জন্য ক্যাথোড রশ্মিগুচ্ছের বিচ্যুতি পরিমাপ করে $(e/m)$ নিরূপণ করা সম্ভব।

(2·8a) চিত্র থেকে দেখা যায় যে E এবং F প্লেট দুটির মধ্যে প্রযুক্ত তড়িৎক্ষেত্রে প্রবেশের পূর্বে ক্যাথোড রশ্মি কণিকাগুলির গতি $x$ অভি-

চিত্র 2.8

ক্যাথোড রশ্মির (a) তাড়িত এবং (b) চৌম্বক বিচ্যুতি।

মুখে থাকে এবং $X$ তড়িৎক্ষেত্রের প্রভাবে সেগুলি $y$ অভিমুখে বিচ্যুত হয়। সুতরাং $y$ অভিমুখে তাদের গতির সমীকরণ হবে

$$m \frac{d^2y}{dt^2} \quad Xe \tag{2.5}$$

যেহেতু $x$ অভিমুখে অগ্রসর হবার পথে ক্যাথোড রশ্মিগুলির $y$ দিকে অর্জিত বেগ $qy/qt$ এবং সরণ $y$ ক্রমশঃ বৃদ্ধি পায়, অতএব এই সংখ্যা দুটি $x$ স্থানাংকের উপরে নির্ভর করে। সুতরাং (2·5) সমীকরণকে লেখা যায়

$$\frac{d}{dx}\left(\frac{dy}{dt}\right)\frac{dx}{dt} = \frac{Xe}{m}$$

যেহেতু $dx/dt = v$ ধ্রুবক থাকে, অতএব উপরের সমীকরণ থেকে সমাকলন করে পাওয়া যায়

$$\frac{dy}{dt} = \int \frac{Xe}{mv}\, dx = \frac{e}{mv}\int X dx \tag{2.6}$$

$x=0$ অবস্থানে $dy/dt=0$ হয়; অতএব (২·6) সমীকরণে সমাকলন ধ্রুবকটি (Integration Constant) শূন্য হয়। (২·6) সমীকরণকে লেখা যায়

$$\frac{dy}{dx} \cdot \frac{dx}{dt} = \frac{e}{mv} \int X dx$$

পুনরায় সমাকলন করে পাওয়া যায়

$$y_c = \frac{e}{mv^2} \int_0^L dx \left( \int X dx \right) \qquad (2.7)$$

এখানে $X$ তড়িৎক্ষেত্র $x=0$ থেকে $x=L$ অবস্থানে রক্ষিত প্রতিপ্রভ পর্দা পর্যন্ত বিস্তৃত বলে ধরা হয়েছে।

সমমান (Uniform) তড়িৎক্ষেত্রে প্লেট দুটির মধ্যে $X=$ ধ্রুবক এবং এদের বাইরে $X=0$ হয়। এক্ষেত্রে উপরের সমাকলন দুটি সহজেই নির্ণয় করা যায়। বাস্তব ক্ষেত্রে সম্পূর্ণ সমমান তড়িৎক্ষেত্র উৎপন্ন করা সম্ভব নয়। প্লেট দুটির প্রান্তে তড়িৎক্ষেত্রের বহির্বিস্তার থাকে। সুতরাং এক্ষেত্রে বিভিন্ন অবস্থানে $X$ পরিমাপ করে উপরের সমাকলনের মান নির্ণয় করা যায়।

আবার (২·8b) চিত্রে M চৌম্বক মেরুদ্বয়ের মধ্যে $z$ দিকে ক্রিয়াশীল $H$ চৌম্বক ক্ষেত্রের জন্য $y$ দিকে উৎপন্ন বিচ্যুতি অনুরূপভাবে নির্ণয় করা যায়। এক্ষেত্রে ক্যাথোড রশ্মি কণিকাগুলির গতি সমীকরণ হয়

$$m \frac{d^2y}{dt^2} = \frac{Hev}{c}$$

উপরে আলোচিত পদ্ধতিতে এই সমীকরণের সমাধান পাওয়া যায়

$$y_m = \frac{e}{mvc} \int_0^L dx \left( \int H dx \right) \qquad (2.8)$$

পূর্বের মতই বিভিন্ন অবস্থানে $H$ পরিমাপ করে উপরের সমাকলনের মান পাওয়া যায়।

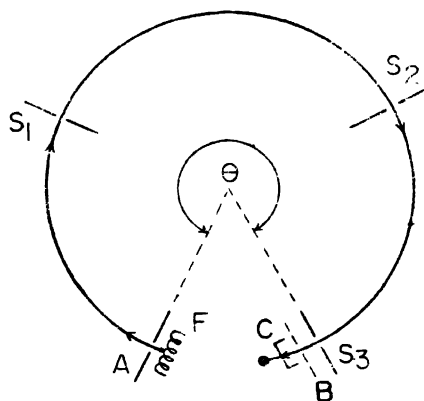
তাড়িত বা চৌম্বক বিচ্যুতি পরিমাপ করে এবং (২·4) সমীকরণের সাহায্যে $v$ নির্ণয় করে (২·7) বা (২·8) সমীকরণ থেকে ক্যাথোড রশ্মির $e/m$ নিরূপণ করা যায়।

মোক্ষণ নলের মধ্যে বিভিন্ন গ্যাস ব্যবহার করে টমসন দেখান যে ক্যাথোড রশ্মির $e/m$ সব ক্ষেত্রেই সমান হয়।

টমসন ক্যাথোড রশ্মির যে $e/m$ নিরূপণ করেন তা খুব সঠিক হয়নি। পরে আরও অনেকে নানাবিধ উন্নততর পদ্ধতিতে খুব সঠিক ভাবে ক্যাথোড রশ্মির $e/m$ নির্ণয় করেন। এর মধ্যে ডানিংটন (Dunnington) কর্তৃক অনুষ্ঠিত পরীক্ষা সম্বন্ধে পরবর্তী অনুচ্ছেদে বিশদভাবে আলোচনা করা হয়েছে।

## 2.5: ডানিংটনের পরীক্ষা

(2.9) চিত্রে প্রদর্শিত ডানিংটনের পরীক্ষা ব্যবস্থায় F হচ্ছে একটি তড়িৎপ্রবাহ দ্বারা উত্তপ্ত ধাতব তন্তু যার থেকে ইলেকট্রন নির্গত হয়।

চিত্র 2.9

ক্যাথোড রশ্মির $e/m$ নির্ণয়ের জন্য ডানিংটনের পরীক্ষা ব্যবস্থা।

এর সামনে রেখা ছিদ্র (Slit) সম্পন্ন একটি ধাতব প্লেট A থাকে। F এবং A প্লেটের মধ্যে বেতার কম্পাংক সম্পন্ন পরিবর্তী তড়িৎক্ষেত্র প্রয়োগ করা হয়। F থেকে নির্গত ইলেকট্রনগুলি এই তড়িৎক্ষেত্রের ধনাত্মক অর্ধকম্পন কালে A কর্তৃক আকৃষ্ট হয়। যন্ত্রটির মধ্যে বায়ুর চাপ খুব নিম্নমানে রাখা হয় এবং সমস্ত যন্ত্রটি পুস্তকের পাতার অভিলম্বে ক্রিয়াশীল উচ্চ চৌম্বক ক্ষেত্রের ($H$) মধ্যে স্থাপিত থাকে। এর ফলে A প্লেটের রেখাছিদ্র দিয়ে নির্দিষ্ট বেগে নির্গত ইলেকট্রনগুলি একটি নির্দিষ্ট ব্যাসার্ধের বৃত্তচাপ ধরে পরিভ্রমণ করে। $S_1$, $S_2$, এবং $S_3$ এই রেখাছিদ্র তিনটির সাহায্যে ইলেকট্রনের বৃত্তাকার পরিভ্রমণ পথ নির্ধারিত করা হয়। এই বৃত্তাকার পথ পরিভ্রমণ করার পর ইলেকট্রনগুলি একটি

তার জালি (Grid) B পার হয়ে C সংগ্রাহকের উপরে আপতিত হয়। F এবং A প্লেটের মধ্যে যে বেতার কম্পাংক সম্পন্ন পরিবর্তী তড়িৎক্ষেত্র ক্রিয়া করে সেই একই তড়িৎক্ষেত্র $S_3$ ও B তার জালির মধ্যেও প্রযুক্ত হয়। যদি এই তড়িৎক্ষেত্রের অভিমুখ এমন হয় যে ইলেকট্রনগুলি B দ্বারা বিকৃষ্ট হয় না তবেই তারা C কর্তৃক সংগৃহীত হবে এবং গ্যালভ্যানোমিটার G কিছুটা তড়িৎ প্রবাহ নির্দেশ করবে। কিন্তু যদি ইলেকট্রনগুলির A থেকে $S_3$ পর্যন্ত পরিভ্রমণের সময় ($t$) তড়িৎক্ষেত্রের কম্পনকালের ($T$) পূর্ণ গুণিতক হয়, অর্থাৎ $t = nT$ ($n$=পূর্ণসংখ্যা) হয়, তাহলে ইলেক-ট্রনগুলি B কর্তৃক বিকৃষ্ট হয় এবং যখন তারা B তার জালিতে পেঁছায় তখন তাদের গতিশক্তি শূন্য হয়ে যায়। B ও C সংগ্রাহকের মধ্যে যদি একটি স্বল্পমান বিকর্ষক বিভব ক্রিয়া করে, তাহলে ইলেকট্রনগুলি এই অবস্থায় C পর্যন্ত পেঁছতে পারে না এবং গ্যালভ্যানোমিটার কোন প্রবাহ নির্দেশ করে না।

যদি ইলেকট্রনগুলির বৃত্তাকার পথের ব্যাসার্ধ $r$ হয় এবং তাদের বেগ $v$ হয়, তাহলে এই অবস্থায় লেখা যেতে পারে

$$v = \frac{r\theta}{t} = \frac{r\theta}{nT} = \frac{r\nu\theta}{n}$$

এখানে $\nu = 1/T$ হচ্ছে পরিবর্তী তড়িৎক্ষেত্রের কম্পাংক (Frequency)। আবার যেহেতু $mv^2/r = Hev/c$, অতএব $v = Her/mc$।

সুতরাং আমরা পাই

$$\frac{Her}{mc} = \frac{r\nu\theta}{n}$$

অর্থাৎ

$$\frac{e}{mc} = \frac{\nu\theta}{nH} \qquad (2\cdot9)$$

পরীক্ষাকালে চৌম্বক ক্ষেত্র $H$ পরিবর্তন করে গ্যালভ্যানোমিটার কর্তৃক নির্দেশিত প্রবাহকে শূন্য করা হয়। পরিবর্তী তড়িৎক্ষেত্রের কম্পাংক $\nu$ জানা থাকলে যন্ত্রের গঠন থেকে $\theta$ পরিমাপ করে, সমীকরণ (2·10) থেকে $e/mc$ নির্ণয় করা যায়।

বর্তমানে ইলেকট্রনের আপেক্ষিক আধানের সার্বিকভাবে স্বীকৃত মান হচ্ছে $e/mc = (1\cdot7589 \pm 0\cdot0005) \times 10^7$ e.m.u. প্রতি গ্রামে। সব রকম

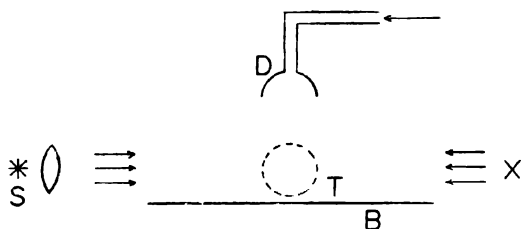
উৎস থেকে প্রাপ্ত ইলেকট্রনের ক্ষেত্রেই $e/m$ এর উপরোক্ত মান পাওয়া যায়, যদি অবশ্য তাদের বেগ আলোকের বেগের তুলনায় অনেক কম হয়।

পরবর্তী অনুচ্ছেদে ইলেকট্রনের আধান নিরূপণের পদ্ধতি বর্ণনা করা হবে। নিরূপিত আধান এবং উপরে প্রদত্ত আপেক্ষিক আধানের মান থেকে ইলেকট্রনের ভরের মান পাওয়া যায় $m = 9 \cdot 1084 \times 10^{-28}$ গ্রাম।

এখানে উল্লেখযোগ্য যে ইলেকট্রনের বেগ যখন খুব উচ্চ হয় এবং আলোকের বেগ $c$ এর সংগে তুলনীয় হয় তখন আইনষ্টাইনের আপেক্ষিকতাবাদ অনুযায়ী এদের ভর বৃদ্ধি পায় (8·10 অনুচ্ছেদ দ্রষ্টব্য)। ফলে খুব উচ্চ বেগ সম্পন্ন ইলেকট্রনের ক্ষেত্রে আপেক্ষিক আধান ধ্রুবক পাওয়া যায় না। এ সম্বন্ধে পরে (13·2) অনুচ্ছেদে বিস্তারিত আলোচনা করা হবে। ইলেকট্রনের ভরের উপরে প্রদত্ত মান হচ্ছে এর স্থিরাবস্থার মান।

## 2.6: ইলেকট্রনের আধান নিরূপণ; মিলিকানের তৈলবিন্দু পরীক্ষা

প্রখ্যাত আমেরিকান বিজ্ঞানী মিলিকান (Millikan) ১৯০৯ খৃষ্টাব্দে টমসন (Thomson) এবং উইলসন (Wilson) কর্তৃক উদ্ভাবিত পরীক্ষা প্রণালীকে আরও উন্নত করে সর্বপ্রথম সঠিকভাবে ইলেকট্রনের আধান নিরূপণ করেন।

মিলিকানের পরীক্ষা পদ্ধতি (2·10) চিত্রে দেখান হয়েছে। এই চিত্রে A ও B দুটি সমান্তরাল অনুভূমিক (Horizontal) বৃত্তাকার ধাতব চাকতি। এদের মধ্যে কয়েক সহস্র ভোল্ট/সেমি পর্যন্ত তড়িৎক্ষেত্র

চিত্র 2.10

মিলিকানের তৈলবিন্দু পরীক্ষা ব্যবস্থা। D ধারাযন্ত্রের সাহায্যে তৈলবিন্দু উৎপন্ন করা হয়। S আলোক-উৎসের সাহায্যে প্লেট দুটির অন্তর্বর্তী স্থানকে আলোকিত করা হয় এবং T অনুবীক্ষণের সাহায্যে তৈলবিন্দুগুলিকে পর্যবেক্ষণ করা হয়। X হচ্ছে একটি X-রশ্মির আধার।

প্রয়োগ করার ব্যবস্থা থাকে। উপরের চাকতিটির ঠিক কেন্দ্রস্থলে কয়েকটি ছোট ছোট ছিদ্র করা থাকে। D একটি ছোট ধারাযন্ত্র (Atomiser), যার সাহায্যে ছোট ছোট তৈলবিন্দু ধারাবর্ষণ (Spray) করে ছিদ্রগুলির ভিতর দিয়ে চাকতি দুটির মধ্যবর্তী স্থানে প্রবিষ্ট করান যায়। ধারাযন্ত্র থেকে নির্গমনকালে তৈলবিন্দুগুলি ঘর্ষণের ফলে আহিত হয়ে যায়। যদি চাকতি দুটির মধ্যে কোন তড়িৎক্ষেত্র প্রয়োগ না করা হয়, তাহলে তারা অভিকর্ষের টানে নীচের দিকে পড়তে থাকে। এই পতনের পথে প্রধান বাধা হচ্ছে বায়ুর সান্দ্রতা (Viscosity)। উদ্গতীয় (Hydrodynamic) তত্ত্ব থেকে জানা যায় যে যদি একটি $r$ ব্যাসার্ধ সম্পন্ন গোলক কোন সান্দ্র (Viscous) তরলের মধ্য দিয়ে পড়তে থাকে, তাহলে কিছুদূর পড়বার পর তার বেগ ($v$) ধ্রুবক হয়ে যায়। স্টোক্সের সূত্র (Stoke's Law) অনুযায়ী এই অবস্থায় তার গতির উপর সান্দ্রতা জনিত বাধার পরিমাণ $6\pi\eta rv$ হয়। এখানে $\eta$ হচ্ছে পদার্থটির সান্দ্রতা গুণাংক (Coefficient of Viscosity)। স্পষ্টতঃ এই অবস্থায় গোলকটির উপর অভিকর্ষজ টান উপরোক্ত বাধার সমান হয়, যার ফলে তার বেগ ধ্রুবক হয়। যদি তৈলের ঘনত্ব হয় $\rho$ এবং বাতাসের ঘনত্ব হয় $\sigma$, তাহলে তৈল বিন্দুটির উপর অভিকর্ষজ টান

$$w = \tfrac{4}{3}\pi r^3 (\rho - \sigma) g$$

হবে। স্পষ্টতঃ এক্ষেত্রে

$$w = \tfrac{4}{3}\pi r^3 (\rho - \sigma) g = 6\pi\eta r v \qquad (2.10)$$

অতএব
$$r^2 = \frac{9\ \eta v}{2\ (\rho - \sigma)\ g} \qquad (2.11)$$

সুতরাং
$$w = \frac{4\pi}{3} \left(\frac{9}{2}\ \eta v\right)^{\frac{3}{2}} \frac{1}{\sqrt{(\rho - \sigma) g}} \qquad (2.12)$$

চাকতি দুটির মধ্যবর্তী স্থানকে একটি বিজলী বাতি S ও লেন্সের সাহায্যে আলোকিত করা হয়। এদের ভিতরের পৃষ্ঠ দুটি কৃষ্ণায়িত (Blacken) করা থাকে, যাতে তাদের উপর থেকে আলোক প্রতিফলিত না হতে পারে। একটি অপেক্ষাকৃত দীর্ঘ ফোকাস সম্পন্ন T অণুবীক্ষণের সাহায্যে তৈলবিন্দুগুলিকে পর্যবেক্ষণ করা হয়। এই অণুবীক্ষণের অভিনেত্রে (Eye-piece) একটি স্কেল লাগান থাকে, যার সাহায্যে এদের বেগ মাপা সম্ভব। বেগ জানা থাকলে, (2.11) সমীকরণের সাহায্যে তৈলবিন্দুর ব্যাসার্ধ $r$ নির্ণয় করা যায়।

এরপর A ও B চাকতি দুটির মধ্যে একটি তড়িৎক্ষেত্র প্রয়োগ করা হয়, যার মান ইচ্ছামত পরিবর্তন করা যায়। তড়িৎক্ষেত্র প্রয়োগের ফলে $e_n$ আধানবাহী তৈলবিন্দুর উপর $Xe_n$ বল ক্রিয়া করে। যদি তড়িৎক্ষেত্রের দিক এমন হয় যে তার জন্য তৈলবিন্দুর উপর কার্যকরী বল অভিকর্ষজ বলের বিপরীত দিকে ক্রিয়া করে, তাহলে বিন্দুটির পতনের বেগ কমে যাবে। ক্ষেত্র-প্রাবল্য বাড়িয়ে বা কমিয়ে ইচ্ছামত এই বেগ নিয়ন্ত্রিত করা সম্ভব এবং প্রয়োজনমত বিন্দুটির গতি ঊর্ধ্বমুখীও করা যায়। অণুবীক্ষণের সাহায্যে এই ঊর্ধ্বমুখী বেগ পরিমাপ করা যায়। এই পরিবর্তিত বেগ যদি $v_1$ হয়, তাহলে আমরা পাই

$$Xe_n - w = 6\pi\eta r v_1 \tag{2.13}$$

(2.10) ও (2.13) সমীকরণের সাহায্যে আমরা পাই

$$\frac{Xe_n}{w} = \frac{v + v_1}{v} \tag{2.14}$$

যেহেতু সমীকরণ (2·12) থেকে $w$ পাওয়া যায়, অতএব সমীকরণ (2·14) ব্যবহার করে $e_n$ নির্ণয় করা যায়। এরপর মিলিকান A ও B চাকতি দুটির মধ্যবর্তী স্থানের বাতাসের মধ্য দিয়ে X-রশ্মি পাঠানর ব্যবস্থা করেন। X-রশ্মির ক্রিয়ার ফলে উক্ত স্থানের বাতাসের অণুগুলি আয়নিত হয়। গতীয় তত্ত্ব (Kinetic Theory) অনুযায়ী বাতাসের অণুগুলি পরস্পরের সংগে এবং সময় সময় তৈলবিন্দুগুলির সংগেও সংঘাত প্রাপ্ত হয়। যদি একটি আয়নিত অণু এবং একটি আহিত তৈলবিন্দুর মধ্যে সংঘাত ঘটে, তাহলে তৈলবিন্দুটির আধানের পরিবর্তন হতে পারে। এইভাবে পরিবর্তিত আধানের মান $e'_n$ ধরা যাক। আধান পরিবর্তনের ফলে তৈলবিন্দুটির গতি হঠাৎ পরিবর্তিত হয়ে যায়, কারণ এর উপরে ক্রিয়াশীল তড়িৎক্ষেত্রজ বল পরিবর্তিত হয়। যদি বিন্দুটির নূতন বেগ $v_2$ হয়, তাহলে আমরা লিখতে পারি

$$Xe'_n - w = 6\pi\eta r v_2 \tag{2.15}$$

সমীকরণ (2·13) ও (2·15) থেকে পাওয়া যায়

$$X(e'_n - e_n) = 6\pi\eta r(v_2 - v_1)$$

অতএব (2·10) সমীকরণের সাহায্যে আমরা পাই

$$\frac{x(e'_n - e_n)}{w} = \frac{v_2 - v_1}{v}.$$

সুতরাং সমীকরণ (2·12) থেকে পাওয়া যায়

$$e'_n - e_n = \frac{w}{X}\frac{v_2 - v_1}{v} = \frac{4\pi}{3X}\left(\frac{9}{2}\eta\right)^{\frac{3}{2}}\left\{\frac{v}{(\rho-\sigma)g}\right\}^{\frac{1}{2}}(v_2 - v_1) \tag{2.16}$$

(2·16) সমীকরণে $(v_2 - v_1)$ সংখ্যাটির মান তৈলবিন্দুর আধান পরিবর্তনের মানের উপর নির্ভর করে। মিলিকান দীর্ঘ সময় ধরে একটি নির্দিষ্ট তৈলবিন্দুর উপরে দৃষ্টি নিবদ্ধ রেখে লক্ষ্য করেন যে তড়িৎক্ষেত্রের মধ্যে এর বেগ বারবার বিভিন্ন পরিমাণে পরিবর্তিত হয়। বেগ পরিবর্তন পরিমাপ করে প্রত্যেকবার তিনি আধান পরিবর্তনের মান নির্ণয় করেন এবং দেখেন যে এই নির্ণীত মানগুলি একটি ন্যূনতম সংখ্যার পূর্ণ গুণিতক হয়। আধানের এই ন্যূনতম মানকে তিনি ইলেকট্রনের আধান $e$ বলে ধরে নেন।

মিলিকান লক্ষ্য করেন যে খুব ক্ষুদ্র তৈলবিন্দুর ক্ষেত্রে ইলেকট্রনের আধানের পরিমিত মান কিছু পরিমাণ বেশী হয়। এর কারণ হচ্ছে যে এক্ষেত্রে ষ্টোক্‌সের সূত্র (সমীকরণ 2·10) সম্পূর্ণ সঠিক নয়।

অতি ক্ষুদ্র তৈলবিন্দুগুলি বাতাসের অণুসমূহের সংগে সংঘাতের ফলে বিচলিত গতি সহকারে পড়তে থাকে, যেমন দেখা যায় ব্রাউনীয় গতির ক্ষেত্রে। মিলিকান অনুমান করেন যে এক্ষেত্রে সান্দ্রতাজনিত বাধার পরিমাণ কমে যায় এবং এই বাধা বাতাসের অণুগুলির গড় মুক্তপথ $(\lambda)$ ও তৈলবিন্দুর ব্যাসার্ধের অনুপাতের $(\lambda/r)$ উপর নির্ভর করে। যেহেতু $\eta$ বাতাসের চাপের ব্যাস্তানুপাতিক হয়, অতএব (2·10) সমীকরণের বদলে আমরা লিখতে পারি

$$w = \frac{4}{3}\pi r^3(\rho - \sigma)g = \frac{6\pi\eta r v}{1 + b/pr} \tag{2.17}$$

এখানে $b$ হচ্ছে একটি ধ্রুবক। ষ্টোক্‌সের সূত্রে উপরোক্ত সংশুদ্ধি প্রয়োগ করলে, (2·16) সমীকরণের পরিবর্তে পাওয়া যায় ($\because b/pr << 1$),

$$e'_n - e_n = \frac{4\pi}{3X}\left\{\frac{9}{2}\,\frac{\eta}{1+b/pr}\right\}^{\frac{3}{2}}\left\{\frac{v}{(\rho-\sigma)g}\right\}^{\frac{1}{2}}(v_2 - v_1) \tag{2.18}$$

সমীকরণ (2·16) থেকে ইলেকট্রনের আধানের আপাত (Apparent) মান

পাওয়া যায়। যদি এই আপাত মানকে $e'$ লেখা যায়, তাহলে (2·16) ও (2·18) সমীকরণ থেকে আমরা পাই

$$(e'/e)^{\frac{2}{3}} = 1 + b/pr \qquad (2.19)$$

$e$ হচ্ছে ইলেকট্রন আধানের সঠিক নির্ণেয় মান। বিভিন্ন ব্যাসার্ধের তৈল-বিন্দু নিয়ে পরীক্ষা করে $(e')^{\frac{2}{3}}$ এবং $1/pr$ সংখ্যা দুটির যদি একটি লেখচিত্র আঁকা যায় তাহলে তার থেকে $b$ ধ্রুবকটি এবং সঠিক ইলেকট্রনীয় আধান $e$ নিরূপণ করা সম্ভব।

মিলিকান তাঁর পরীক্ষা থেকে $e = 4{\cdot}774 \times 10^{-10}$ e.s.u. পান। পরবর্তী কালে আরও অনেক পরীক্ষার পর ইলেকট্রনীয় আধানের যে সঠিক মান পাওয়া যায়, মিলিকানের নির্ণীত মান অপেক্ষা তা অল্প বেশী। বর্তমানে ইলেকট্রনের আধানের সঠিক নির্ণীত মান ধরা হয়

$$e = 4{\cdot}8029 \times 10^{-10} \text{ e.s.u.}$$

মিলিকান বাতাসের সান্দ্রতা গুণাংকের ($\eta$) যে মান ব্যবহার করেন, তা ছিল ত্রুটিপূর্ণ। সেই জন্য তাঁর নির্ণীত $e$ এর মান অল্প পরিমাণে ত্রুটি-পূর্ণ ছিল। পরবর্তীকালে তাঁর পরীক্ষালব্ধ রাশিমালা (Data) এবং বাতাসের সান্দ্রতা গুণাংকের সঠিক মান ব্যবহার করে $e$ নিরূপণ করে দেখা যায় যে এর মান উপরে প্রদত্ত সঠিক মানের খুব কাছাকাছি হয়। এর থেকে বোঝা যায় যে মিলিকান যে পরীক্ষা করেছিলেন তা খুবই নিখুঁত ছিল।

মিলিকানের পরীক্ষায় শুধু যে ইলেকট্রনের আধানের সঠিক মান নিরূপিত হয় তাই নয়, এর থেকে আরও বোঝা যায় যে বৈদ্যুতিক আধানের একটা পারমাণবিক প্রকৃতি (Atomicity) আছে; অর্থাৎ প্রকৃতিতে বৈদ্যুতিক আধানের একটা মৌলিক একক আছে, এবং সব আধানই এই মৌলিক এককের পূর্ণ গুণিতক হয়। কোন বস্তুর আধান বা আধানের পরিবর্তন এই মৌলিক এককের ভগ্নাংশ পরিমাণে হতে পারে না, সব সময় এর পূর্ণ গুণিতক পরিমাণে হবে।

বৈদ্যুতিক আধানের এই পারমাণবিক প্রকৃতির কথা তড়িৎ বিশ্লেষণ (Electrolysis) পরীক্ষা থেকে ইতিপূর্বে জানা ছিল ফ্যারাডের তড়িৎ বিশ্লেষণ সূত্র থেকে জানা যায় যে তড়িৎদ্বারে বাহিত কোন পদার্থের ভর দ্রবণের মধ্য দিয়ে প্রবাহিত মোট আধানের সমানুপাতিক। ফ্যারাডে দেখান যে এক গ্রাম হাইড্রোজেন বাহিত করতে যে আধান প্রবাহিত হয় তার পরিমাণ হচ্ছে 96520 কুলম্ব। তিনি আরও দেখান যে এক গ্রাম পরমাণু

পরিমাণ কোন এক যোজী পদার্থ (যথা 107·9 গ্রাম রূপা) বাহিত করতে এই একই পরিমাণ আধান প্রবাহিত হওয়ার প্রয়োজন হয়। উপরোক্ত আধানের পরিমাণকে বলা হয় এক 'ফ্যারাডে'। যে কোন দ্বিযোজী পদার্থের এক গ্রাম-পরমাণু বাহিত করতে দুই ফ্যারাডে আধান প্রবাহিত হওয়ার প্রয়োজন, ত্রিযোজী পদার্থের ক্ষেত্রে তিন ফ্যারাডের প্রয়োজন, ইত্যাদি। ফ্যারাডের এই পরীক্ষাগুলির সঠিক ব্যাখ্যা করেন জনষ্টন ষ্টোনী (Johnston Stoney), ১৮৭৪ সালে। ষ্টোনীর মতানুসারে তড়িৎ বিশ্লেষণ কালে যে কোন পদার্থের অভ্যন্তরস্থ প্রত্যেকটি পরমাণু একটি নির্দিষ্ট পরিমাণ বৈদ্যুতিক আধান বহন করে তড়িৎদ্বারে মুক্ত হয়। যেহেতু প্রতিটি পরমাণুর নির্দিষ্ট ভর আছে, কাজেই মুক্ত পদার্থের ভর এবং স্থানান্তরিত আধান পরস্পরের সমানুপাতিক হয়। যে কোন একযোজী পদার্থের পরমাণু যতটা আধান বহন করে, তাই হল আধানের ন্যূনতম পরিমাণ, অর্থাৎ আধানের মৌলিক একক। পূর্বেই বলা হয়েছে যে ষ্টোনী এর নাম দেন ইলেকট্রন। তিনি এই আধানের পরিমাণও নির্ণয় করেন। যেহেতু এক গ্রাম-পরমাণুর মধ্যে হাইড্রোজেন আয়নের সংখ্যা অ্যাভোগেড্রো সংখ্যার (Avogadro Number) সমান, অতএব প্রতি হাইড্রোজেন আয়নের আধানের পরিমাণ হবে

$$e = \frac{96520}{6 \cdot 025 \times 10^{23}} = 1 \cdot 60 \times 10^{-19} \text{ কুলম্ব} = 4 \cdot 80 \times 10^{-10} \text{ e.s.u.}$$

উপরে প্রদত্ত ইলেকট্রনের আধান ও এই আধানের পরিমাণ পরস্পরের সমান।

## 2.7: ধনাত্মক রশ্মি

আমরা ইতিপূর্বে দেখেছি যে নিম্ন চাপে তড়িৎ মোক্ষণ সম্পর্কিত পরীক্ষার সময়, ঋণাত্মক ও ধনাত্মক, দুই প্রকার আয়নের সৃষ্টি হয়। এদের মধ্যে ঋণাত্মক আয়নগুলি হচ্ছে সকল পদার্থের সার্বিক উপাদান ইলেকট্রন, যাদের প্রকৃতি সম্বন্ধে পূর্ব অনুচ্ছেদে আলোচনা করা হয়েছে।

ধনাত্মক আয়নগুলির প্রকৃতি নিয়ে প্রথম পরীক্ষা করেন গোল্ডষ্টাইন (Goldstein) নামক জার্মাণ বিজ্ঞানী। তিনি ১৮৮৬ খৃষ্টাব্দে মোক্ষণ সম্পর্কিত পরীক্ষা অনুষ্ঠিত করার সময় লক্ষ্য করেন যে নল মধ্যস্থ ক্যাথোডের গাত্রে যদি একটি ছোট ছিদ্র থাকে, তাহলে ক্যাথোডের পিছন দিকে (অর্থাৎ অ্যানোড যেদিকে থাকে তার বিপরীত দিকে) একটি

দীপ্তিমান রশ্মি দেখা যায়। তিনি প্রথমে এর নাম দেন 'ক্যানেল রশ্মি' (Canal Rays)।

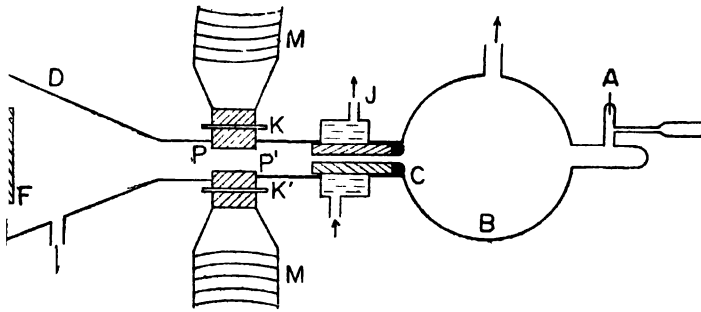
এই রশ্মিগুলি তড়িৎক্ষেত্র ও চৌম্বক ক্ষেত্র দ্বারা বিচ্যুত হয়। এর থেকে প্রমাণিত হয় যে ক্যাথোড রশ্মির মত এরাও এক প্রকার আহিত কণিকার দ্বারা সৃষ্ট রশ্মি। তড়িৎক্ষেত্র বা চৌম্বক ক্ষেত্রে এদের বিচ্যুতির দিক লক্ষ্য করলে বোঝা যায় যে এই কণিকাগুলি ধনাত্মক আধান বহন করে। সেইজন্য পরে এদের নাম দেওয়া হয় ধনাত্মক রশ্মি (Positive Rays)।

এই রশ্মির উৎপত্তির কারণ সহজেই বোঝা যায়। নিম্নচাপ মোক্ষণ নলে উৎপন্ন ধনাত্মক আয়নগুলি ক্যাথোড কর্তৃক আকৃষ্ট হয়ে অ্যানোড থেকে ক্যাথোডের দিকে পরিভ্রমণ করে। এদের মধ্যে কিছু সংখ্যক ধনাত্মক আয়ন ক্যাথোডের ছিদ্র পার হয়ে পিছন দিকে চলে যায়। সেখানকার নিম্ন চাপ গ্যাস অণুগুলির সঙ্গে তাদের যে সংঘাত ঘটে, তার ফলে অণুগুলি উত্তেজিত হয়ে আলোক নিঃসৃত করে। সেইজন্য ক্যাথোডের পিছন দিকে ধনাত্মক আয়নগুলির ভ্রমণপথ দীপ্তিমান হয়। এই ধনাত্মক আয়নগুচ্ছকেই ধনাত্মক রশ্মি আখ্যা দেওয়া হয়।

এদের স্বরূপ নির্ণয় করার জন্য টমসন (Thomson) ১৯১১ সালে পরবর্তী অনুচ্ছেদে বর্ণিত পদ্ধতিতে সর্বপ্রথম এদের $E/M$ নিরূপণ করেন।

## 2.8: টমসনের ধনাত্মক রশ্মি বিশ্লেষণের অধিবৃত্ত পদ্ধতি

(২·11) চিত্রে টমসন কর্তৃক ব্যবহৃত যন্ত্র দেখান হয়েছে। B একটি বড় কাঁচ নির্মিত ফাঁপা গোলক। পাম্পের সাহায্যে এর ভিতরকার গ্যাসের চাপ ইচ্ছামত কমান যায়। গোলকের মধ্যে গ্যাসের চাপ খুব কম হলে উৎপন্ন ধনাত্মক রশ্মির তীব্রতা এত ক্ষীণ হয় যে তাতে পরীক্ষা অনুষ্ঠিত করার অসুবিধা হয়। সেই জন্য এর এক প্রান্তে অবস্থিত A অ্যানোডের নিকটস্থ একটি খুব সরু কৈশিক (Capillary) নলের মধ্য দিয়ে অত্যল্প হারে পরীক্ষাধীন গ্যাস সরবরাহ করার ব্যবস্থা থাকে, যাতে একগুচ্ছ ইলেকট্রন এই গ্যাসের অণুগুলির সঙ্গে সংঘাতের দ্বারা যথেষ্ট পরিমাণে ধনাত্মক আয়ন সৃষ্টি করতে পারে। গোলকটির অন্য দিকে একটি কাঁচনল সংযুক্ত করা থাকে—যার মধ্যে ক্যাথোড C অবস্থিত থাকে। ক্যাথোডটি একটি ধাতব নলের আকৃতি বিশিষ্ট। এর অ্যানোডমুখী প্রান্তটি অ্যালুমিনিয়াম দ্বারা নির্মিত হয়, যাতে ধনাত্মক আয়নগুলি এর উপরে ক্রমাগত আপতিত হয়ে স্পাটারিং (Sputtering) প্রক্রিয়ার দ্বারা একে বেশী ক্ষয়প্রাপ্ত না করতে

চিত্র 2·11

ধনাত্মক রশ্মির $e/m$ নির্ণয়ের জন্য টমসনের পরীক্ষা ব্যবস্থা।

পারে। ক্যাথোডের মধ্য দিয়ে এক প্রান্ত থেকে অন্য প্রান্ত পর্যন্ত 0·1 মিমি ব্যাস সম্পন্ন একটি সূক্ষ্ম ছিদ্র থাকে। ক্যাথোডের উপর আপতিত ধনাত্মক আয়নগুলির কিছু অংশ এই ছিদ্রের মধ্যে দিয়ে নির্গত হয়ে ক্যাথোডের অন্য দিকে একটি খুব সূক্ষ্ম সমান্তরিত (Collimated) ধনাত্মক রশ্মিগুচ্ছের সৃষ্টি করে। দীর্ঘকালব্যাপী আয়ন বর্ষণের ফলে ক্যাথোডটি উত্তপ্ত হয়ে যাবার সম্ভাবনা। সেই জন্য একটি কাঁচের আবরণীর (J) মধ্য দিয়ে জল প্রবাহিত করে একে ঠাণ্ডা করার ব্যবস্থা থাকে।

ক্যাথোডের ছিদ্র থেকে নির্গত ধনাত্মক রশ্মিগুচ্ছ একই স্থানে এবং একই দিকে ক্রিয়াশীল একটি তড়িৎক্ষেত্র ও একটি চৌম্বক ক্ষেত্রের মধ্য দিয়ে পরিভ্রমণ করে। চৌম্বক ক্ষেত্রটি M বৈদ্যুতিক চুম্বকের সাহায্যে উৎপন্ন করা হয়। এর দুটি মেরুর সম্মুখ ভাগ (P, P′) চুম্বকের দেহ থেকে (K, K′) অভ্রের চাদরের সাহায্যে অন্তরিত (Insulated) করা থাকে। এগুলি নরম লোহার তৈয়ারী এবং এদের মধ্যে প্রয়োজন মত উচ্চ বিভব-প্রভেদ প্রয়োগ করে একটি তড়িৎক্ষেত্র সৃষ্টি করা যায়। আবার বৈদ্যুতিক চুম্বকের কুণ্ডলীর মধ্যে তড়িৎপ্রবাহের দ্বারা এদের মধ্যে একটি চৌম্বক ক্ষেত্রও সৃষ্টি করা যায়। এইভাবে একই স্থানে এবং একই দিকে ক্রিয়াশীল তড়িৎক্ষেত্র ও চৌম্বক ক্ষেত্র উৎপন্ন করার ব্যবস্থা করা হয়।

তড়িৎক্ষেত্র ও চৌম্বক ক্ষেত্র থেকে নির্গত হয়ে ধনাত্মক রশ্মিগুলি খুব নিম্নচাপে রাখা শঙ্কুর আকৃতিবিশিষ্ট D কাঁচ পাত্রের মধ্যে প্রবেশ করে, যার অপর প্রান্তে একটি ফোটোগ্রাফিক প্লেট (F) রাখা থাকে। এই প্লেটের তল অবিচ্যুত ধনাত্মক রশ্মিগুলির অভিলম্বে স্থাপিত থাকে। টমসনের পরীক্ষায় D কাঁচপাত্রের ভিতরকার গ্যাসের চাপ তরল বায়ুর উষ্ণতায় রাখা

কাঠকয়লার সাহায্যে 0·0001 মিমি পর্যন্ত হ্রাস করার ব্যবস্থা করা হয়। এই চাপ B কাঁচ গোলকের মধ্যেকার চাপ অপেক্ষা অনেক কম। B ও D এই দুটি পরস্পর সংযুক্ত পাত্রকে যে বিভিন্ন চাপে রাখা সম্ভব হয় তার কারণ হচ্ছে তাদের সংযোগস্থলে অতি সূক্ষ্ম ছিদ্র সম্পন্ন ক্যাথোডের অবস্থিতি। এই ছিদ্রের সূক্ষ্মতা এবং দৈর্ঘ্যের জন্য এর মধ্য দিয়ে B পাত্রের ভিতরকার গ্যাসের অতি স্বল্পাংশই D পাত্রের মধ্যে প্রবেশ করতে পারে।

B পাত্রের তুলনায় D পাত্রের ভিতরের চাপ এত কম রাখার কারণ হচ্ছে যে ধনাত্মক আয়নগুলি অন্য গ্যাস অণুর সঙ্গে সংঘাতের ফলে তাদের প্রায় সব শক্তিই হারিয়ে ফেলে। D পাত্রের চাপ যদি খুব নিম্ন না হয়, তাহলে এই পদ্ধতিতে শক্তি ক্ষয়ের সম্ভাব্যতা খুব বেশী হয়। তার ফলে তড়িৎ ও চৌম্বক ক্ষেত্রে ধনাত্মক রশ্মিগুচ্ছের বিচ্যুতি পরিমাপ করা খুবই শক্ত হয়, কারণ এদের বেশীর ভাগই F প্লেট পর্যন্ত পৌঁছবার আগেই সংঘাতের ফলে শক্তিহীন হয়ে অন্যদিকে বিচ্যুত হয়ে চলে যায়।

যখন তড়িৎ বা চৌম্বক ক্ষেত্র ক্রিয়া করে না, তখন ধনাত্মক রশ্মিগুচ্ছের কোন বিচ্যুতি ঘটে না এবং এই রশ্মিগুচ্ছ F ফোটোগ্রাফিক প্লেটের উপরে আপতিত হয়ে একটি কেন্দ্রীয় অবিচ্যুত কৃষ্ণ বিন্দুর সৃষ্টি করে। এরপরে তড়িৎ এবং চৌম্বক ক্ষেত্র প্রয়োগ করলে রশ্মিগুচ্ছ বিচ্যুত হয়। এই বিচ্যুতি গাণিতিক পদ্ধতিতে নির্ণয় করা যায়।

ধনাত্মক আয়নগুলির আধান, ভর এবং $x$-অক্ষ অভিমুখী প্রাথমিক বেগ যথাক্রমে ε, $M$ এবং $v$ ধরা যাক। যেহেতু তড়িৎ এবং চৌম্বক ক্ষেত্র পরস্পরের সমান্তরালে $y$-অক্ষ অভিমুখে ক্রিয়া করে, অতএব তাড়িত ও চৌম্বক বিচ্যুতি পরস্পরের অভিলম্বে ঘটে। (2·4) অনুচ্ছেদে ক্যাথোড রশ্মির ক্ষেত্রে এই দুই প্রকার বিচ্যুতি প্রতিপন্ন করা হয়েছে। সমীকরণ (2·7) অনুযায়ী $y$-অভিমুখে উৎপন্ন তাড়িত বিচ্যুতির মান হয়ঃ

$$\frac{\varepsilon}{Mv^2}\int_0^L dx\left(\int X dx\right) \tag{2.20}$$

আবার সমীকরণ (2·8) অনুযায়ী $z$-অভিমুখে উৎপন্ন চৌম্বক মান হয়ঃ

$$z=\frac{\varepsilon}{Mvc}\int_0^L dx\left(\int H dx\right) \tag{2.21}$$

(2·20) এবং (2·21) সমীকরণে সমাকলনগুলি (Integrals) তড়িৎ এবং চৌম্বক ক্ষেত্রের প্রাবল্যের (Intensity) উপরে ও উক্ত ক্ষেত্রদ্বয়ের জ্যামিতিক বিস্তৃতির উপরে নির্ভর করে। সুতরাং তড়িৎ ও চৌম্বক ক্ষেত্রের নির্দিষ্ট মানে এই সমাকলনগুলিকে ধ্রুবক ধরা যেতে পারে। অতএব আমরা লিখতে পারি

$$y = K_e \varepsilon / M v^2 \tag{2.22}$$

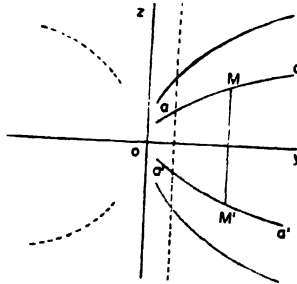
$$z = K_m \varepsilon / M v \tag{2.23}$$

এখানে $K_e$ ও $K_m$ দুটি ধ্রুবক সংখ্যা। (2·22) এবং (2·23) সমীকরণ থেকে আমরা পাই

$$z^2/y = G.\varepsilon/M \tag{2.24}$$

এখানে $G$ একটি ধ্রুবক, যার মান তড়িৎ ও চৌম্বক ক্ষেত্রের মানের উপর এবং যন্ত্রটির জ্যামিতিক গঠনের উপরে নির্ভর করে। এখানে লক্ষ্যণীয় যে (2·24) সমীকরণ থেকে আয়নগুলির প্রাথমিক বেগ $v$ লোপ পেয়েছে। নির্দিষ্ট তড়িৎ ও চৌম্বক ক্ষেত্রে নির্দিষ্ট প্রকৃতির আয়নের জন্য ($\varepsilon/m$ = ধ্রুবক) সমীকরণ (2·24) থেকে পাওয়া যায়

$$z^2/y = \text{ধ্রুবক} \tag{2.25}$$

সমীকরণ (2·25) হচ্ছে একটি অধিবৃত্তের (Parabola) সমীকরণ। সুতরাং F ফোটোগ্রাফিক প্লেটের উপর (অর্থাৎ $y$-$z$ সমতলে) বিভিন্ন বেগসম্পন্ন সমপ্রকৃতির আয়নগুলি একটি অধিবৃত্ত রেখা বরাবর আপতিত হয়। (2·12) চিত্রে এইরূপ কয়েকটি অধিবৃত্ত প্রদর্শিত হয়েছে। বিভিন্ন

2·12 চিত্র
ধনাত্মক রশ্মি অধিবৃত্ত।

অধিবৃত্তগুলি উৎপন্ন হয় বিভিন্ন $\varepsilon/M$ সম্পন্ন আয়নগুচ্ছের দ্বারা। যে কোন একটি অধিবৃত্তের বিভিন্ন বিন্দুর সৃষ্টি হয় একই $\varepsilon/M$ কিন্তু বিভিন্ন বেগসম্পন্ন আয়নের দ্বারা।

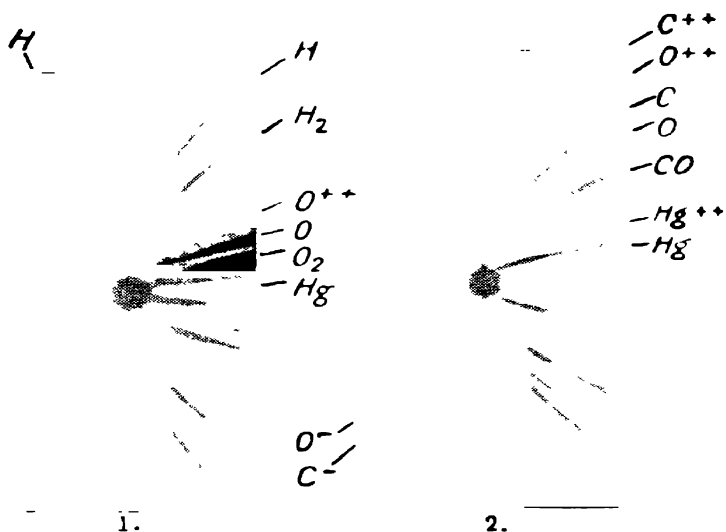
টমসন তাঁর প্রাথমিক পরীক্ষা করেন হাইড্রোজেন গ্যাস ব্যবহার করে। $H$ ও $X$ জানা থাকলে, অধিবৃত্তের উপরকার যে কোন বিন্দুর স্থানাংকদ্বয় $y$ ও $z$ পরিমাপ করে, সমীকরণ (2·24) থেকে $\varepsilon/M$ নির্ণয় করা যায়। হাইড্রোজেনের ক্ষেত্রে ধনাত্মক রশ্মির $\varepsilon/M = 9571$ *e.m.u.* পাওয়া যায়। তড়িৎ বিশ্লেষণ পরীক্ষা থেকে হাইড্রোজেন আয়নের যে $\varepsilon/M$ পাওয়া যায় তার সংগে উপরোক্ত পরিমাপ বেশ ভালভাবেই মিলে যায়। কাজেই এর থেকে সিদ্ধান্ত করা যায় যে হাইড্রোজেন গ্যাসে উৎপন্ন ধনাত্মক রশ্মিগুলি ইলেকট্রনবিহীন হাইড্রোজেন পরমাণু হতে অভিন্ন। অর্থাৎ হাইড্রোজেন আয়ন কর্তৃক বাহিত ধনাত্মক আধান ইলেকট্রন কতৃর্ক বাহিত ঋণাত্মক আধানের সমান। (3·4) অনুচ্ছেদে দেখা যাবে যে হাইড্রোজেন পরমাণুর কেন্দ্রস্থলে একটি ভারী ধনাত্মক আধানবাহী কেন্দ্রক (Nucleus) থাকে, যাকে বেষ্টন করে একটিমাত্র ইলেকট্রন আবর্তিত হয়। এই ইলেকট্রনটি হাইড্রোজেন পরমাণু থেকে বিচ্ছিন্ন করলে, শুধু ধনাত্মক আধানবাহী কেন্দ্রকটি পড়ে থাকে। এই কেন্দ্রকটিকে বলা হয় 'প্রোটন' (Proton)। এটি একটি মৌলিক কণিকা এবং সব রকম পরমাণুর কেন্দ্রকের একটি সার্বিক (Universal) উপাদান। এর ভর ইলেকট্রনের ভরের $(1836 \cdot 13 \pm 0 \cdot 01)$ গুণ বেশী।

সমীকরণ (2·24) থেকে ধনাত্মক রশ্মির $\varepsilon/M$ নির্ণয় করতে হলে $y$ ও $z$ অভিমুখে বিচ্যুতির সঠিক পরিমাপ প্রয়োজন। এজন্য ফোটোগ্রাফিক প্লেটের উপর $y$ ও $z$ অক্ষ দুটি সঠিকভাবে নির্দিষ্ট করা প্রয়োজন, যা সাধারণতঃ খুব সহজ নয়। সেইজন্য কিছুক্ষণ পরীক্ষা চালানর পর চৌম্বক ক্ষেত্র বিপরীতমুখী করা হয়, যার ফলে $y$ অক্ষের নীচের দিকে আর একটি অধিবৃত্ত পাওয়া যায়। (2·12) চিত্রে দেখা যায় যে এই দ্বিতীয় অধিবৃত্তটি $(a'a')$ ঠিক যেন প্রথমটির $(aa)$ দর্পণে প্রতিফলিত প্রতিবিম্বের মত। যে কোন বিন্দুতে এদের মধ্যেকার দূরত্ব $MM' = 2z$ পরিমাপ করে সমীকরণ (2·24) থেকে $\varepsilon/M$ নির্ণয় করা হয়।

টমসনের পরীক্ষায় প্রাপ্ত অধিবৃত্ত সম্বন্ধে নিম্নলিখিত তথ্যগুলি লক্ষ্যণীয়ঃ

(ক) একই আধানসম্পন্ন দুই প্রকার গ্যাসের ধনাত্মক আয়নের জন্য দুটি বিভিন্ন অধিবৃত্ত পাওয়া যায়। এদের মধ্যে অপেক্ষাকৃত বেশী ভারী আয়নের অধিবৃত্তের অবস্থান অন্যটি অপেক্ষা $y$ অক্ষের নিকটতর হয়।

যেহেতু হাইড্রোজেন সর্বাপেক্ষা হালকা মৌল, অতএব হাইড্রোজেন পরমাণুর আয়নের অধিবৃত্ত $y$ অক্ষ থেকে সর্বাপেক্ষা বেশী দূরে সৃষ্ট হয়। (2·13 চিত্র দ্রষ্টব্য)। সমীকরণ (2·24) থেকে এর কারণ সহজেই বোঝা যায়। (খ) অধিবৃত্তগুলি মূলবিন্দু (Origin) O পর্যন্ত বিস্তৃত হয় না। সাধারণতঃ এরা মূলবিন্দু থেকে কিছু দূরে $y$ স্থানাংকের একটি নির্দিষ্ট নিম্নতম মান থেকে শুরু হয়। সমীকরণ (2·23) থেকে দেখা যায় যে তড়িৎ ক্ষেত্রজ বিচ্যুতি ($y$) আয়নগুলির অর্জিত শক্তির ব্যস্তানুপাতিক। যদি B গোলকের ভিতরের অ্যানোড ও ক্যাথোডের মধ্যে বিভব প্রভেদ হয় $V$, তাহলে $\varepsilon$ আধানসম্পন্ন যে কোন ভরের একটি আয়ন কর্তৃক অর্জিত শক্তির উচ্চতম সম্ভাব্য মান হবে $\varepsilon V = \frac{1}{2}Mv^2$। আয়নটি যদি অ্যানোডের ঠিক সামনে সৃষ্ট হয়, তবেই সেটি ক্যাথোড পর্যন্ত পরিভ্রমণ করে এই পরিমাণ শক্তি অর্জন করবে। গোলকের মধ্যে অন্য যে কোন স্থানে সৃষ্ট আয়ন ক্যাথোড পর্যন্ত পৌঁছবার সময় এর চেয়ে কম শক্তি অর্জন করবে। কাজেই সমীকরণ (2·22) অনুসারে অধিবৃত্তগুলির $y$ স্থানাংকের একটি নিম্নতম মান থাকে।

(গ) যদিও $y$ স্থানাংকের নিম্নতম মান সম্বন্ধে উপরোক্ত তথ্য মোটামুটি ভাবে সঠিক, বেশীর ভাগ ক্ষেত্রেই কিন্তু $y$ স্থানাংকের আরও নিম্নতর মান পর্যন্ত অধিবৃত্তগুলির একটি ক্ষীণ বিস্তৃতি মূলবিন্দুর দিকে কিছুদূর পর্যন্ত দেখতে পাওয়া যায়। (2·13) চিত্র ভালভাবে লক্ষ্য করলে এই বিস্তৃতি বেশ বোঝা যায়। এই বিস্তৃতির কারণ হচ্ছে যে একটি গ্যাসের ধনাত্মক আয়নগুলি এক, দুই বা ততোধিক ইলেকট্রনীয় আধান ($e$) সহকারে সৃষ্ট হতে পারে। এখন $\varepsilon = ne$ আধান সম্পন্ন একটি ধনাত্মক আয়নের কথা বিবেচনা করা যাক। এখানে $n$ হচ্ছে একটি পূর্ণসংখ্যা ($n > 1$)। B গোলকের মধ্যে এই আয়ন কর্তৃক সর্ব্বোচ্চ অর্জিত শক্তির মান $neV = \frac{1}{2}Mv^2$ হবে। এই শক্তি অর্জন করে আয়নটি ক্যাথোডের ছিদ্র পার হবার সময় যদি এক বা একাধিক ইলেকট্রন আকর্ষণ করে নিজের দেহে সংযুক্ত করে, তাহলে এর ধনাত্মক আধানের পরিমাণ কমে যায়। আধানের এই নূতন মান $e$ ধরা যাক। স্পষ্টতঃ এর পরে চৌম্বক ও তড়িৎ ক্ষেত্র দ্বারা বিচ্যুত এই আয়নটি $ne/M$ আপেক্ষিক আধান সম্পন্ন আয়নের অধিবৃত্ত রেখার উপর আপতিত না হয়ে ($e/M$) আপেক্ষিক আধান সম্পন্ন আয়নের অধিবৃত্ত রেখার উপর আপতিত হবে। কিন্তু যেহেতু এর উচ্চতম সম্ভাব্য শক্তি ($neV$) এক ইলেকট্রনীয় আধান সম্পন্ন আয়নের সর্ব্বোচ্চ অর্জিত শক্তি ($eV$) অপেক্ষা অনেক বেশী, অতএব এই আয়নটি

চিত্র 2·13

টমসন ধনাত্মক রশ্মি অধিবৃত্তের নমুনা।

(Arnold & Co কর্তৃক প্রকাশিত F. W. Aston প্রণীত Mass Spectra and Isotopes গ্রন্থ থেকে প্রাপ্ত)

অধিবৃত্তের যে বিন্দুতে আপতিত হবে তা উপরে আলোচিত নিম্নতম $y$ স্থানাংক সম্পন্ন বিন্দু অপেক্ষা মূলবিন্দুর (Origin) আরও কাছাকাছি অবস্থিত হবে।

(ঘ) প্রত্যেকটি অধিবৃত্তের জন্য আপেক্ষিক আধানের একটি নির্দিষ্ট মান আছে। উপরে দেখা গেছে যে একই গ্যাসের আয়ন বিভিন্ন ইলেকট্রনীয় আধান সম্পন্ন হয়ে সৃষ্ট হতে পারে। যথা অক্সিজেন পরমাণুর আয়ন যথাক্রমে এক বা দুই ইলেকট্রনীয় আধান সম্পন্ন $O^+$ বা $O^{++}$ রূপে সৃষ্ট হতে পারে। দ্বিতীয় ক্ষেত্রে সৃষ্ট আয়নের আপেক্ষিক আধান প্রথম ক্ষেত্রের দ্বিগুণ হবে। এই দুই প্রকার আয়নের জন্য দুটি পৃথক অধিবৃত্ত পাওয়া যাবে। $O^{++}$ আয়নের জন্য প্রাপ্ত অধিবৃত্ত $O^+$ আয়নের অধিবৃত্ত অপেক্ষা $y$ অক্ষ থেকে দূরে অবস্থিত হবে। একই গ্যাসের উচ্চতর আধান সম্পন্ন আয়নের অধিবৃত্তগুলি সাধারণতঃ ক্ষীণতর হয়ে থাকে।

## 2. 9 : আইসোটোপ

১৯১২ সালে টমসন নীয়ন গ্যাস নিয়ে পরীক্ষা করবার সময় দুটি খুব কাছাকাছি অবস্থিত অধিবৃত্ত উৎপন্ন হতে দেখেন। এদের মধ্যে একটি রেখা বেশ স্পষ্ট, অপরটি অপেক্ষাকৃত ক্ষীণতর। স্পষ্টতর রেখা সৃষ্টি-কারী আয়নগুলির পরমাণবিক ভর নির্ণয় করে পাওয়া যায় $M = 20$ আর অন্যটির ক্ষেত্রে পরমাণবিক ভর $M = 22$ পাওয়া যায়। অপরপক্ষে রাসায়নিক পদ্ধতিতে পরিমিত নীয়নের পরমাণবিক ভর $M = 20 \cdot 2$ পাওয়া যায়। যে কোন উৎস থেকে এবং যত পরিশুদ্ধ নীয়ন গ্যাস নিয়ে পরীক্ষা করা হোক না কেন সব সময় এই রকম দুটি অধিবৃত্ত দেখা যায় এবং তাদের তীব্রতার (Intensity) অনুপাত সব সময় সমান পাওয়া যায়। এর থেকে বোঝা যায় যে ক্ষীণতর অধিবৃত্ত রেখা সৃষ্টিকারী আয়নগুলি পরীক্ষাধীন নীয়ন গ্যাসের মধ্যে বর্তমান কোন অপদ্রব্যের (Impurity) জন্য হতে পারে না। অগত্যা টমসন সিদ্ধান্ত করেন যে নীয়ন গ্যাসের মধ্যে দুই শ্রেণীর পরমাণু থাকে, এক শ্রেণীর পরমাণবিক ভর হচ্ছে $M = 20$, অন্য শ্রেণীর ক্ষেত্রে $M = 22$ হচ্ছে পরমাণবিক ভর। এই দুই শ্রেণীর পরমাণুর রাসায়নিক প্রকৃতি অভিন্ন। যদি নীয়ন গ্যাসে প্রথমোক্ত শ্রেণীর পরমাণু শতকরা 90 ভাগ পরিমাণে বর্তমান থাকে আর দ্বিতীয় শ্রেণীর পরমাণু শতকরা 10 ভাগ পরিমাণে বর্তমান থাকে, তাহলে নীয়নের গড় পরমাণবিক ভর হওয়া উচিত

$$M = 20 \times 0 \cdot 9 + 22 \times 0 \cdot 1 = 20 \cdot 2$$

এইভাবে নীয়ন গ্যাসের রাসায়নিক পদ্ধতিতে পরিমিত পরমাণবিক ভরের মান কেন 20·2 হয় তা বোঝা সম্ভব।

কোন একটি মৌলের একই রাসায়নিক গুণাবলী, কিন্তু বিভিন্ন ভর সম্পন্ন পরমাণুর অস্তিত্বের কথা ইতিপূর্বে তেজস্ক্রিয় পদার্থ সংক্রান্ত গবেষণাকালে সডী (Soddy) নামক বিজ্ঞানী অনুমান করেন। এগুলিকে বলা হয় 'আইসোটোপ' (Isotope)। সডীর গবেষণার কথা পরে আলোচনা করা হবে। টমসনের উপরে বর্ণিত পরীক্ষা থেকে স্থায়ী মৌলের ক্ষেত্রেও আইসোটোপের অস্তিত্ব প্রমাণিত হয়। টমসনের এই আবিষ্কার পরবর্তী যুগে পরমাণু-কেন্দ্রকের (Atomic Nucleus) গঠন নির্ণয়ে অপরিসীম গুরুত্বপূর্ণ।

অধিবৃত্ত প্রণালী দ্বারা আয়নগুলির পরমাণবিক ভরের সঠিক পরিমাপ সম্ভব নয়। বস্তুতঃ টমসন কর্তৃক প্রাপ্ত স্পষ্টতর অধিবৃত্ত রেখা সৃষ্টিকারী নীয়ন আয়নগুলির পরমাণবিক ভরের মান যে ঠিক 20, এবং তা 20·2 (নীয়নের রাসায়নিক পরমাণবিক ভর) নয়, তা টমসনের পরিমাপ থেকে নিশ্চিতভাবে প্রমাণিত হয়নি। স্পষ্টতঃ যদি আয়নগুলির পরমাণবিক ভর 20·2 হয়, তাহলে টমসন যে নীয়নের দুই প্রকার আইসোটোপের কথা অনুমান করেন সে সম্বন্ধে সংশয় থেকে যায়। অতএব আয়নগুলির পরমাণবিক ভর আরও সঠিক ভাবে পরিমাপ করার প্রয়োজন দেখা দেয়, যাতে নিশ্চিত-ভাবে বলা যায় যে স্পষ্টতর অধিবৃত্ত রেখা সৃষ্টিকারী আয়নগুলির পরমাণবিক ভর 20 কীনা। অ্যাসটন (F. W. Aston) নামক বৃটিশ বিজ্ঞানী এরপর একটি খুব সূক্ষ্ম যন্ত্র উদ্ভাবিত করেন, যার নাম হচ্ছে 'ভর বর্ণালীলেখ যন্ত্র' (Mass Spectrograph)। এই যন্ত্রের সাহায্যে বিভিন্ন প্রকার আয়নের পরমাণবিক ভর খুব সঠিক ভাবে নিরূপণ করা সম্ভব। এর সাহায্যে নীয়নের উপরোক্ত দুই প্রকার আইসোটোপের অস্তিত্বের কথা সংশয়াতীত ভাবে প্রমাণিত হয়। অ্যাসটনের যন্ত্রটি এবং আরও কয়েকটি সমশ্রেণীর যন্ত্র সম্বন্ধে ষোড়শ পরিচ্ছেদে বিস্তৃত আলোচনা করা হবে। এখানে উল্লেখযোগ্য যে এই ভর বর্ণালীমাপক যন্ত্রগুলির সাহায্যে শুধু যে পরমাণুর ভর খুব সঠিকভাবে নির্ণয় করা যায় তাই নয়, একই মৌলের বিভিন্ন আইসোটোপগুলির আপেক্ষিক প্রাচুর্য্যও (Relative Abundance) সঠিকভাবে নির্ণয় করা সম্ভব।

পরবর্তী যুগে বিভিন্ন মৌল নিয়ে পরীক্ষা করে অনেক ক্ষেত্রেই মৌল-গুলির একাধিক স্থায়ী আইসোটোপের সন্ধান পাওয়া যায়। যথা অক্সি-জেনের তিন প্রকার স্থায়ী আইসোটোপ আছে: $O^{16}$, $O^{17}$ এবং $O^{18}$।

প্রাকৃতিক অক্সিজেন হচ্ছে এই তিন প্রকার আইসোটোপের নির্দিষ্ট অনুপাতের (Proportion) মিশ্রণ। এর মধ্যে $O^{16}$ আইসোটোপের অনুপাত হচ্ছে 99·76%, $O^{17}$ হচ্ছে 0·04% এবং $O^{18}$ হচ্ছে 0·2%। আবার ক্লোরিনের দুটি স্থায়ী আইসোটোপ আছেঃ $Cl^{35}$ ও $Cl^{37}$। সর্বাপেক্ষা বেশী সংখ্যক স্থায়ী আইসোটোপের সন্ধান পাওয়া গেছে টিনের ক্ষেত্রে। এদের সংখ্যা হচ্ছে দশ।

এখানে উল্লেখযোগ্য যে আইসোটোপগুলির প্রতীক চিহ্নের দক্ষিণে একটু উপরদিকে যে সংখ্যাগুলি লেখা থাকে সেগুলি তাদের পরমাণবিক ভর নয়, পরমাণবিক ভরের নিকটতম পূর্ণসংখ্যা। এই সংখ্যাকে বলা হয় 'ভর সংখ্যা' (Mass Number), এবং সাধারণতঃ $A$ চিহ্ন দ্বারা নির্দেশিত করা হয়। পরে দেখা যাবে যে আইসোটোপগুলির পরমাণবিক ভর ও তাদের ভরসংখ্যার মানের মধ্যে খুব সামান্য পার্থক্য থাকে। এই পার্থক্য সম্বন্ধে (16·7) অনুচ্ছেদে আলোচনা করা হবে।

আইসোটোপ আবিষ্কারের ফলে ডালটনের পরমাণু তত্ত্বের (Dalton's Atomic Theory) কিছু পরিবর্তন প্রয়োজন। কারণ নির্দিষ্ট একটি মৌলের সব পরমাণুগুলিই সমরূপী হয়, এই মতবাদ এখন আর গ্রাহ্য নয়।

## 2. 10: পরমাণবিক ভরের একক

রসায়নবিদগণ পরমাণবিক ভারের (Atomic Weight) একক হিসাব করেন অক্সিজেনের পরমাণবিক ভার 16 ধরে। অর্থাৎ রাসায়নিক পরমাণবিক ভারের একক হচ্ছে অক্সিজেনের পরমাণবিক ভারের ষোল ভাগের একভাগ। আইসোটোপ আবিষ্কারের পর পদার্থবিদগণ পরমাণবিক ভারের অন্য একক ব্যবহার করেন। তাঁরা $O^{16}$ আইসোটোপের পরমাণবিক ভার 16 ধরেন, এবং তাঁদের ব্যবহৃত একক হচ্ছে $O^{16}$ আইসোটোপের পরমাণবিক ভারের ষোল ভাগের এক ভাগ। পারমাণবিক ভারের এই ভৌত (Physical) একক এবং রাসায়নিক এককের অনুপাত 1 : 1·00027 হয়।

সাম্প্রতিক কালে ভৌতিক ও রাসায়নিক, এই দুই ভিন্ন এককের পরিবর্তে পরমাণবিক ভারের একটি মাত্র একক ব্যবহারের সুপারিশ করেছেন মাতাউখ (Mattauch) নামক জার্মান বিজ্ঞানী। তাঁর প্রস্তাব অনুযায়ী কার্বনের $C^{12}$ আইসোটোপের পরমাণবিক ভার 12 ধরা হবে এবং পরমাণবিক ভার বা ভরের একক হবে এর বার ভাগের এক ভাগ। প্রাকৃতিক কার্বনের দুটি স্থায়ী আইসোটোপ আছে, $C^{12}$ ও $C^{13}$; এদের অনুপাত হচ্ছে যথাক্রমে 98·89% এবং 1·11%। বিভিন্ন দেশের রসায়নবিদ ও পদার্থবিদগণ এই প্রস্তাব গ্রহণ করেছেন।

# পরিচ্ছেদ 3

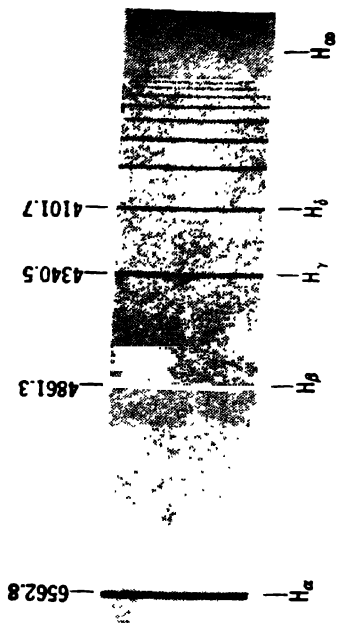
# পরমাণুর গঠন ; বোর সমারফেলড তত্ত্ব

## 3. 1 : সূচনা

দ্বিতীয় পরিচ্ছেদে আমরা দেখেছি যে প্রতিটি মৌলের পরমাণুর মধ্যে ধনাত্মক ও ঋণাত্মক দুই প্রকার আধান সমপরিমাণে বর্তমান থাকে। ঋণাত্মক আধান বহন করে ইলেকট্রন নামক এক প্রকার লঘু কণিকা। পরমাণুর দেহ থেকে ইলেকট্রনগুলিকে বিচ্ছিন্ন করলে যে ধনাত্মক আধান-বাহী অংশ অবশিষ্ট থাকে তারই মধ্যে পরমাণুর প্রায় সমগ্র ভর নিহিত থাকে। এখন প্রশ্ন হচ্ছে এই দুই প্রকার আধানবাহী দুই অংশ পরমাণুর মধ্যে কী ভাবে বিন্যস্ত থাকে? আমরা জানি যে ধনাত্মক ও ঋণাত্মক এই দুই প্রকার বিপরীতধর্মী আধান পরস্পরকে আকর্ষণ করে। এই আকর্ষণের ফলে তারা যদি পরস্পরের সংগে সম্পূর্ণ মিলিত হয়ে যায় তাহলে তাদের আধান বিনষ্ট হয়ে যাবার কথা। কিন্তু পরমাণুর মধ্যে তা হয় না; দুই প্রকার আধান তাদের নিজস্ব সত্ত্বা বজায় রেখে অবস্থান করে। পরমাণুর মধ্যে দুই প্রকার বিপরীতধর্মী আধানের সম্ভাব্য বিন্যাস সম্বন্ধে সর্বপ্রথম একটি প্রস্তাবনা দেন টমসন (J J Thomson), ১৯০৭ সালে। একে বলা হয় 'পরমাণুর টমসন-প্রতিরূপ' (Thomson Model of the Atom)।

## 3. 2: টমসন প্রতিরূপ

টমসন কল্পনা করেন যে পরমাণু যেন একটি ধনাত্মক আধানের গোলক। এই গোলকের ব্যাসার্ধ সমগ্র পরমাণুর ব্যাসার্ধের সমান। পদার্থের গতীয় তত্ত্ব (Kinetic Theory of Matter) থেকে আমরা জানি যে এই ব্যাসার্ধের মাত্রা $10^{-8}$ সেমির মত। এই ধনাত্মক আধানবাহী গোলকের মধ্যে বিন্দু সদৃশ ঋণাত্মক ইলেকট্রনগুলি কতকগুলি নির্দিষ্ট অবস্থানে বিন্যস্ত থাকে। ইলেকট্রনগুলি অবশ্য স্থির থাকে না তারা নির্দিষ্ট কম্পাংকে স্পন্দিত হতে থাকে।

টমসন কল্পিত এই প্রতিরূপের কিন্তু অনেক ত্রুটি আছে। বর্ণালী-মাপক যন্ত্রের সাহায্যে বিভিন্ন মৌল কর্তৃক নিঃসৃত আলোকের বর্ণালী বিশ্লেষণ করলে দেখা যায় যে এই আলোক কতকগুলি নির্দিষ্ট তরঙ্গ দৈর্ঘ্যের আলোকের সমষ্টি মাত্র। বর্ণালীমাপক যন্ত্রে এগুলি এক একটি

চিত্র 3·1

হাইড্রোজেন বর্ণালী ( বামার শ্রেণী )।

( From Herzberg · Spectra of Diatomic Molecules, Vol. I, published by Van Nostrand Reinhold Co., Copyright 1950 by Litton Publishing, Inc. )

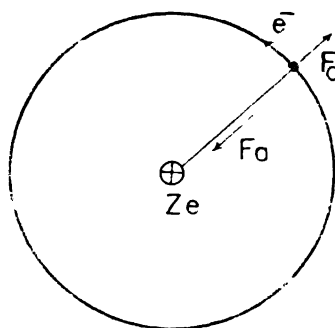
নির্দিষ্ট কম্পাংকের বর্ণালী রেখা হিসাবে দেখা যায় (3.1 চিত্র দ্রষ্টব্য)। প্রতিটি মৌলের আলোকের মধ্যে এই রকম অনেকগুলি বিভিন্ন কম্পাংকের বর্ণালী রেখা দেখতে পাওয়া যায়। আলোকের তড়িৎচুম্বকীয় তত্ত্ব (Electromagnetic Theory of Light) থেকে জানা যায় যে যদি একটি ইলেকট্রন নির্দিষ্ট কম্পাংকে স্পন্দিত হতে থাকে তবে তা থেকে প্রধানতঃ উক্ত বিশেষ কম্পাংকের আলোকই নিঃসৃত হয়। অবশ্য এর দ্বিগুণ, তিনগুণ প্রভৃতি কম্পাংকের আলোকও খুব ক্ষীণধারায় নিঃসৃত হতে পারে। হাইড্রোজেন পরমাণুতে একটি মাত্র ইলেকট্রন থাকে। টমসনের মতবাদ অনুযায়ী একটি মাত্র নির্দিষ্ট কম্পাংকে সেটি স্পন্দিত হতে থাকবে। কাজেই হাইড্রোজেন কর্তৃক নিঃসৃত আলোকের বর্ণালীতে প্রধানতঃ এই একটি মাত্র কম্পাংকের আলোকই থাকা উচিত। অথচ হাইড্রোজেনের বর্ণালীতেও অনেকগুলি বিভিন্ন কম্পাংকের বর্ণালী রেখা (Spectral Lines) দেখা যায় যাদের কম্পাংকের সংগে ইলেকট্রনের স্পন্দন-কম্পাংকের (Vibration Frequency) কোন সম্পর্ক পাওয়া যায় না।

এ ছাড়া উপরোক্ত প্রতিরূপের আর একটি গুরুতর ত্রুটি লক্ষ্য করেন রাদারফোর্ড (Rutherford) ১৯১১ সালে, যখন তিনি তেজস্ক্রিয় পদার্থ নিঃসৃত $\alpha$-কণিকা (অর্থাৎ হিলিয়াম পরমাণুর কেন্দ্রক) বিভিন্ন পরমাণু থেকে বিক্ষিপ্ত (Scattering) করার পরীক্ষা অনুষ্ঠিত করেন। এই অত্যন্ত গুরুত্বপূর্ণ পরীক্ষা সম্বন্ধে পরে (12·11) অনুচ্ছেদে বিশদভাবে আলোচনা করা হবে। রাদারফোর্ডের এই পরীক্ষার সর্বাপেক্ষা গুরুত্বপূর্ণ সিদ্ধান্ত হচ্ছে যে পরমাণুর কেন্দ্রে অবস্থিত ধনাত্মক আধানবাহী অংশের ব্যাসার্ধ সমগ্র পরমাণুর ব্যাসার্ধের তুলনায় খুব কম; এই ব্যাসার্ধের মান $10^{-12}$ সেমি অথবা আরও কম; অর্থাৎ সমগ্র পরমাণুর ব্যাসার্ধের দশ সহস্র ভাগের মত। পরমাণুর এই অপেক্ষাকৃত ভারী অতি ক্ষুদ্র ধনাত্মক অংশের নাম পরবর্তী কালে দেওয়া হয় 'কেন্দ্রক' (Nucleus)। রাদার-ফোর্ডের পরীক্ষার ফলে পরমাণুর প্রতিরূপ সম্বন্ধে টমসনের মতবাদ সম্পূর্ণ অগ্রাহ্য হয়ে যায়।

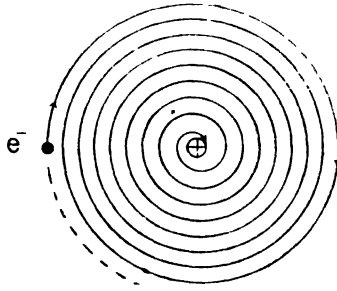
### 3. 3: রাদারফোর্ড প্রতিরূপ

$\alpha$-বিক্ষেপ পরীক্ষার ফলে পরমাণুর কেন্দ্রক সম্বন্ধীয় উপরোক্ত তথ্য প্রতিষ্ঠিত হবার পর পরমাণুর মধ্যে ইলেকট্রনগুলি কেন্দ্রকের চতুর্দিকে কী ভাবে বিন্যস্ত থাকে সে সম্বন্ধে রাদারফোর্ড একটি মতবাদ প্রকাশিত করেন।

কেন্দ্রককে ঘিরে ইলেকট্রনগুলি কী ভাবে বিন্যস্ত থাকে এ সম্বন্ধে সঠিক সিদ্ধান্ত করতে হলে আগেই মনে রাখতে হবে যে ইলেকট্রনগুলি কেন্দ্রকের আকর্ষণ সত্ত্বেও তার উপর গিয়ে পড়তে পারে না। কারণ তা হলে তাদের অস্তিত্বই থাকত না। স্বভাবতঃই এক্ষেত্রে সূর্যের চতুর্দিকে অবস্থিত গ্রহগুলির কথা মনে পড়ে। গ্রহগুলি সূর্যের অভিকর্ষ দ্বারা আকৃষ্ট হয়, অথচ তারা সূর্যের উপর গিয়ে পড়ে না। এটা সম্ভব হয় কারণ তারা সূর্যকে ঘিরে নিজ নিজ নির্দিষ্ট কক্ষপথে আবর্তন করে যার ফলে তাদের উপর একটি বহির্মুখী অপকেন্দ্রিক (Centrifugal) বল ক্রিয়া করে। এই অপকেন্দ্রিক বল অভিকর্ষজ আকর্ষণী বলকে বাতিল করে।

রাদারফোর্ড অনুমান করেন যে পরমাণুর মধ্যে ইলেকট্রনগুলি ঠিক এই ভাবে কেন্দ্রককে ঘিরে আবর্তন করে, যার ফলে অপকেন্দ্রিক বল ও বৈদ্যুতিক আকর্ষণী বল পরস্পরকে বাতিল করে (3.2 চিত্র দ্রষ্টব্য)।

চিত্র 3.2
রাদারফোর্ড প্রতিরূপের চিত্ররূপ।

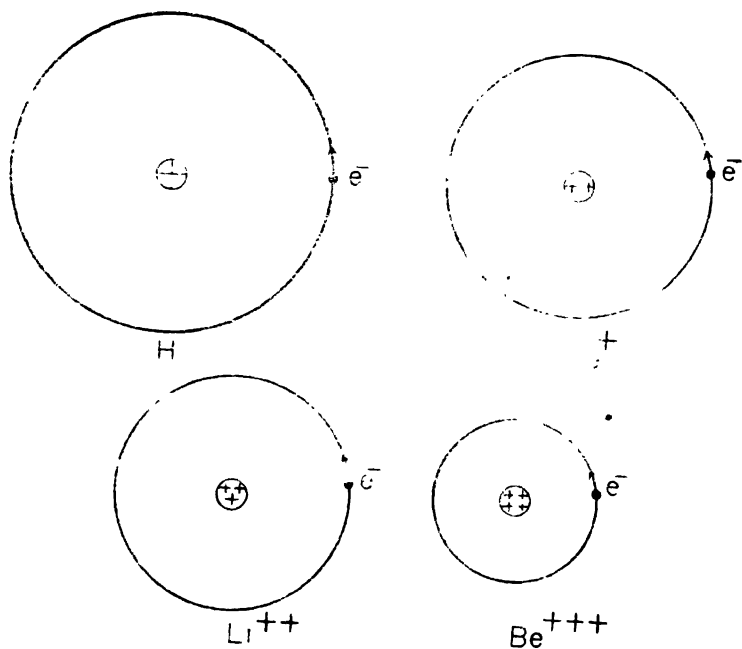
কিন্তু রাদারফোর্ডের এই মতবাদের মধ্যে একটা গুরুতর ত্রুটি থেকে যায়। তড়িৎচুম্বকীয় তত্ত্ব থেকে জানা যায় যে যদি কোন আহিত কণিকা ত্বরণশীল (Accelerated) বা মন্দনশীল (Decelerated) গতিতে বিচরণ করে তাহলে তা থেকে তড়িৎচুম্বকীয় তরঙ্গ নিঃসৃত হতে থাকে, যার ফলে তার শক্তিক্ষয় হয় এবং বেগও কমে যায়। যেহেতু কেন্দ্রককে ঘিরে আবর্তনশীল ইলেকট্রনের উপর অপকেন্দ্রিক বল ক্রিয়া করে, অতএব ইলেকট্রনের গতি ত্বরণশীল মনে করা যেতে পারে। উপরোক্ত তত্ত্ব অনুযায়ী

ক্ট্রনটি এক্ষেত্রে তড়িৎচুম্বকীয় বিকিরণ নিঃসৃত করবে, যার ফলে এর বেগ কমে যাবে। আবর্তনশীল কণিকার বেগ যদি কমে যায় তাহলে তার উপর ক্রিয়াশীল বহির্মুখী অপকেন্দ্রিক বল ($mv^2/r$) কমে যাবে, যার ফলে কেন্দ্রকের আকর্ষণী বলের প্রভাবে তার কক্ষপথের ব্যাসার্ধ ক্রমশঃ কমতে থাকবে। অর্থাৎ ইলেকট্রনটি ক্রমশঃ ছোট হতে থাকা সর্পিল (Spiral) কক্ষপথে আবর্তিত হতে হতে অবশেষে কেন্দ্রকের উপর পড়ে বিলীন হয়ে যাবে (3.3 চিত্র দ্রষ্টব্য)।

চিত্র 3.3
ইলেকট্রনের সর্পিল পথ।

রাদারফোর্ড প্রস্তাবিত পরমাণুর এই প্রতিরূপের উপরোক্ত ত্রুটি বিদূরিত করার জন্য প্রখ্যাত দিনেমার বিজ্ঞানী নীল্স্ বোর (Niels Bohr) একে এক নূতন রূপ দেন ১৯১২ খৃষ্টাব্দে, কয়েকটি নূতন দুঃসাহসিক অনুমানের ভিত্তিতে। বোরের এই অনুমানগুলি বলবিদ্যার এবং তড়িৎচুম্বকীয় তত্ত্বের সনাতন (Classical) নিয়মাবলীর পরিপন্থী এবং সে কারণে এগুলিকে যুগান্তরকারী বলে মনে করা যেতে পারে।

### 3. 4 : বোরের অনুমান

বোর সর্বাপেক্ষা সরল পরমাণু, অর্থাৎ হাইড্রোজেন পরমাণুর কথা বিবেচনা করেন। এই পরমাণুতে একটি মাত্র ইলেকট্রন থাকে এবং এর কেন্দ্রকে একটি মাত্র ধনাত্মক কণিকা, প্রোটন থাকে। বোর কল্পনা করেন যে হাইড্রোজেন পরমাণুর মধ্যে কেন্দ্রককে ঘিরে একটি ইলেকট্রন বৃত্তাকার কক্ষপথে আবর্তন করে। হাইড্রোজেনের পরিবর্তে যদি আয়নিত হিলিয়াম নেওয়া যায়, সেক্ষেত্রেও বোর কল্পিত পরমাণুর উপরোক্ত প্রতিরূপটি প্রযোজ্য

হয়। কারণ হিলিয়াম পরমাণুতে দুটি ইলেকট্রন থাকে। এদের একটিকে পরমাণু থেকে বিচ্ছিন্ন করলে যে ধনাত্মক হিলিয়াম আয়ন ($He^+$) সৃষ্ট হবে, তার কেন্দ্রককে ঘিরে হাইড্রোজেনের মতই একটি মাত্র ইলেকট্রন আবর্তন করবে। অবশ্য কেন্দ্রকে তখন যে ধনাত্মক আধান থাকবে তার মান ইলেকট্রনের আধানের দ্বিগুণ। সাধারণভাবে বলা যায় যে যদি একটি পরমাণুতে $Z$ সংখ্যক ইলেকট্রন থাকে এবং তার থেকে $(Z-1)$ সংখ্যক ইলেকট্রন বিচ্ছিন্ন করা হয়, তাহলে এই আয়নিত পরমাণুর আকৃতি হাইড্রোজেন পরমাণু সদৃশ হবে, অর্থাৎ এর মধ্যে একটি মাত্র ইলেকট্রন (যার আধান $e$ ধরা যেতে পারে) $Ze$ আধান সম্পন্ন কেন্দ্রককে ঘিরে আবর্তিত হবে। $He^+$ ছাড়া $Li^{++}$ $(Z=3)$, $Be^{+++}$ $(Z=4)$, $B^{++++}$ $(Z=5)$ প্রভৃতি আয়ন এই শ্রেণীর মধ্যে পড়ে। এদের বলা

চিত্র 3.4
হাইড্রোজেন সদৃশ পরমাণুর চিত্ররূপ।

হয় 'হাইড্রোজেন সদৃশ পরমাণু' (Hydrogen like atoms)। (3.4) চিত্রে এইরূপ কয়েকটি পরমাণুর চিত্ররূপ দেখান হয়েছে।

হাইড্রোজেন পরমাণুর গঠন সম্পর্কে বোর নিম্নলিখিত তিনটি অনুমানের (Postulates) প্রস্তাবনা দেনঃ

**প্রথম অনুমানঃ** হাইড্রোজেন পরমাণুর কেন্দ্রককে ঘিরে একটি মাত্র ইলেকট্রন কতকগুলি নির্দিষ্ট ব্যাসার্ধের বৃত্তাকার কক্ষপথে আবর্তিত হতে পারে। এই নির্দিষ্ট বৃত্তাকার কক্ষপথগুলিকে বলা যায় '**স্থায়ী কক্ষপথ**' (Stationary Orbits)। স্থায়ী কক্ষপথে আবর্তনশীল ইলেকট্রনের কৌণিক ভরবেগ $p$ (Angular Momentum) $h/2\pi$ সংখ্যাটির পূর্ণ গুণিতক হয়; এখানে $h$ হচ্ছে প্ল্যাংক-ধ্রুবক (Planck's Constant)। এর মান হচ্ছে $h = 6 \cdot 62 \times 10^{-27}$ আর্গ-সেকেন্ড।

প্রথম অনুমান থেকে আমরা দেখতে পাই যে ইলেকট্রনটি বিশেষ কতকগুলি কক্ষপথে আবর্তন করতে পারে; সব কক্ষপথে তাদের আবর্তন সম্ভব নয়। সনাতন বলবিদ্যা (Classical Machanics) অনুযায়ী ইলেকট্রনটি কেন্দ্রককে ঘিরে যে কোন বৃত্তাকার পথে আবর্তিত হতে পারে। স্পষ্টতঃ বোরের এই অনুমান সনাতন বলবিদ্যার উক্ত মতবাদের পরিপন্থী। স্থায়ী কক্ষপথ সম্বন্ধে বোরের এই মতবাদকে বলা হয় 'কোয়ানটাম শর্ত' (Quantum Condition)। পরবর্তীকালে সমারফেলড (Sommerfeld) বোরের এই কোয়ানটাম শর্তকে তাত্ত্বিক ভিত্তিতে প্রতিষ্ঠিত করেন। এ সম্বন্ধে (3.11) অনুচ্ছেদে বিস্তারিত আলোচনা করা হবে।

**দ্বিতীয় অনুমানঃ** যতক্ষণ ইলেকট্রনটি একটি স্থায়ী কক্ষপথে আবর্তিত হতে থাকে ততক্ষণ পরমাণু থেকে কোন তড়িৎচুম্বকীয় বিকিরণ নিঃসৃত হয় না।

স্পষ্টতঃ বোরের এই অনুমান সনাতন তড়িৎচুম্বকীয় তত্ত্বের পরিপন্থী। কারণ আমরা দেখেছি যে উক্ত তত্ত্ব অনুসারে আবর্তনশীল আহিত কণিকা সব সময় তড়িৎচুম্বকীয় বিকিরণ নিঃসৃত করে।

**তৃতীয় অনুমানঃ** পরমাণু কী ভাবে বিকিরণ নিঃসৃত করতে পারে সে সম্বন্ধে বোর কল্পনা করেন যে পরমাণুর মধ্যে নির্দিষ্ট কক্ষপথে আবর্তনশীল ইলেকট্রনটি যদি কোন স্থায়ী কক্ষপথ থেকে অন্য এক স্থায়ী কক্ষপথে লাফ দিয়ে পড়ে, অর্থাৎ সংক্রমণ (Transition) করে, তাহলেই পরমাণু থেকে বিকিরণ নিঃসৃত হতে পারে। যদি আদি স্থায়ী কক্ষপথে ইলেকট্রনটির শক্তি হয় $E_2$ এবং চরম স্থায়ী কক্ষপথে এর শক্তি হয় $E_1$, তাহলে নিঃসৃত বিকিরণের শক্তির পরিমাণ $(E_2 - E_1)$ হয়। প্ল্যাংকের

কোয়ানটাম মতবাদ অনুসারে এই শক্তির পরিমাণ $E_2 - E_1 = h\nu$ হবে। এখানে $\nu$ হচ্ছে নিঃসৃত বিকিরণের কম্পাংক। এই সমীকরণকে বলা হয় 'বোরের কম্পাংক শর্ত' (Frequency Condition)।

যদি $E_1$ অপেক্ষা $E_2$ কম হয়, তাহলে ইলেকট্রনটি $(E_1 - E_2)$ পরিমাণ শক্তি শোষণ করলেই তবে প্রথম স্থায়ী কক্ষপথ থেকে দ্বিতীয় কক্ষপথে সংক্রমণ করতে পারবে। এক্ষেত্রে নিঃসরণের (Emission) পরিবর্তে বিকিরণের শোষণ (Absorption) হবে।

### 3. 5 : বোরের হাইড্রোজেন বর্ণালী তত্ত্ব

উপরোক্ত অনুমানগুলির ভিত্তিতে বোর হাইড্রোজেন বা হাইড্রোজেন সদৃশ পরমাণু কর্তৃক নিঃসৃত বিকিরণের বর্ণালী সম্পর্কিত তত্ত্ব প্রতিষ্ঠা করেন।

মনে করা যাক $(+Ze)$ আধান সম্পন্ন একটি কেন্দ্রককে ঘিরে $r$ ব্যাসার্ধের বৃত্তাকার কক্ষপথে একটি ইলেকট্রন (যার আধান $= -e$) আবর্তিত হয়। ইলেকট্রনটির উপর কেন্দ্রকের আকর্ষণী বলের মান $Ze^2/r^2$ হয় এবং এর উপর ক্রিয়াশীল অপকেন্দ্রিক (Centrifugal) বলের মান $mv^2/r$ হয়; এখানে $m$ হচ্ছে ইলেকট্রনের ভর ও $v$ হচ্ছে এর বেগ। এই দুটি বলের মান পরস্পরের সমান; অর্থাৎ

$$Ze^2/r^2 = mv^2/r \qquad (3.1)$$

এখানে উল্লেখযোগ্য যে কেন্দ্রকটি সম্পূর্ণ স্থির বলে কল্পনা করা হয়। এরূপ হওয়া সম্ভব যদি ধরা যায় যে কেন্দ্রকের ভর অসীম। এই অনুমান কিন্তু সম্পূর্ণ ঠিক নয়। এ সম্বন্ধে (3.8) অনুচ্ছেদে আলোচনা করা হবে।

আবর্তনশীল ইলেকট্রনের কৌণিক ভরবেগ $mr^2\omega = mvr$ হয়; এখানে $\omega$ হচ্ছে ইলেকট্রনের কৌণিক বেগ (Angular Velocity)। অতএব বোরের প্রথম অনুমান থেকে আমরা পাই

$$p = mvr = n\frac{h}{2\pi} \qquad (3.2)$$

এখানে $n$ একটি পূর্ণসংখ্যা; অর্থাৎ $n = 1, 2, 3, 4$ ইত্যাদি। $n$ সংখ্যাটিকে বলা হয় কোয়ানটাম সংখ্যা (Quantum Number)। সমীকরণ (3.1) থেকে পাওয়া যায়

$$v^2 = Ze^2/mr$$

আবার সমীকরণ (3.2) থেকে পাওয়া যায়

$$v = \frac{nh}{2\pi mr} \qquad (3.3)$$

সুতরাং $$Ze^2/mr = n^2h^2/4\pi^2m^2r^2$$

এবং $$r = \frac{n^2h^2}{4\pi^2mZe^2} \qquad (3.4)$$

(3.3) এবং (3.4) সমীকরণ থেকে আমরা পাই

$$v = \frac{2\pi Ze^2}{nh} \qquad (3.5)$$

সমীকরণ (3.4) ও (3.5) থেকে দেখা যায় যে আবর্তনশীল ইলেকট্রনটির কক্ষপথের ব্যাসার্ধ $r$ ও তার বেগ $v$ নির্ভর করে কোয়ানটাম সংখ্যা $n$ এর উপর। কক্ষপথের ব্যাসার্ধ $n$ সংখ্যাটির বর্গানুপাতিক। অর্থাৎ দ্বিতীয় কক্ষপথের ব্যাসার্ধ প্রথমটির চারগুণ, তৃতীয়টি প্রথমটির নয়গুণ ইত্যাদি। যদি $r_1$, $r_2$, $r_3$ প্রভৃতি বিভিন্ন কক্ষপথের ব্যাসার্ধ নির্দেশ করে, তাহলে আমরা পাই

$$r_1 : r_2 : r_3 : \ldots \ldots = 1 : 4 : 9 : \ldots\ldots$$

আবার (3.5) সমীকরণ থেকে দেখা যায় যে ইলেকট্রনের বেগ ক্ষুদ্রতম কক্ষপথে সর্বাপেক্ষা বেশী হয়; দ্বিতীয় কক্ষপথে তার অর্ধেক, তৃতীয়টিতে তার এক তৃতীয়াংশ, ইত্যাদি।

হাইড্রোজেন পরমাণুর ক্ষেত্রে $Z = 1$ হয়; এক্ষেত্রে ক্ষুদ্রতম কক্ষপথের ব্যাসার্ধকে বলা হয় 'বোর ব্যাসার্ধ' (Bohr Radius)। যদি এই ব্যাসার্ধকে $a_0$ চিহ্ন দ্বারা নির্দেশ করা হয়, তাহলে আমরা পাই

$$a_0 = \frac{h^2}{4\pi^2me^2} \qquad (3.6)$$

উপরের সমীকরণে বিভিন্ন সংখ্যার মান বসালে আমরা পাই

$$a_0 = 0{\cdot}528 \times 10^{-8} \text{ সেমি} \qquad (3.7)$$

এই মান গতীয় তত্ত্ব (Kinetic Theory) থেকে প্রাপ্ত হাইড্রোজেন পরমাণুর ব্যাসার্ধের মানের প্রায় সমান। $He^+$ আয়নের ($Z = 2$) ক্ষেত্রে এই ক্ষুদ্রতম কক্ষপথের ব্যাসার্ধ হবে বোর ব্যাসার্ধের অর্ধেক, $Li^{++}$ আয়নের ($Z = 3$) ক্ষেত্রে হবে এর এক তৃতীয়াংশ, ইত্যাদি।

আবার প্রথম বোর কক্ষপথে ($n = 1$), হাইড্রোজেন পরমাণুর ($Z = 1$) ইলেকট্রনের বেগ হয়

$$v_1 = \frac{2\pi e^2}{h} = 2{\cdot}18 \times 10^8 \text{ সেমি/সেকেন্ড} \qquad (3.8)$$

এই বেগ আলোকের বেগের প্রায় 1/137 ভাগ।

কক্ষপথে আবর্তনশীল ইলেকট্রনের মোট শক্তি তার গতিশক্তি ও স্থিতি-শক্তির সমষ্টির সমান। স্পষ্টতঃ ইলেকট্রনের গতিশক্তি হচ্ছে

$$E_k = \tfrac{1}{2}mv^2 = \tfrac{1}{2}m \cdot \frac{Ze^2}{mr} = \frac{Ze^2}{2r} \tag{3.9}$$

আর এর স্থিতিশক্তি হচ্ছে

$$V = -\int^{\infty} \frac{Ze^2}{r^2}\,dr = -\frac{Ze^2}{r} \tag{3.10}$$

অতএব ইলেকট্রনের মোট শক্তি হচ্ছে

$$E = E_k + V = \frac{1}{2}\frac{Ze^2}{r} - \frac{Ze^2}{r} = -\frac{1}{2}\frac{Ze^2}{r} \tag{3.11}$$

সমীকরণ (3.4) এবং (3.11) থেকে ইলেকট্রনের $n$ ক্রমের কক্ষপথের মোট শক্তির মান পাওয়া যায়

$$E_n = -\frac{2\pi^2 m Z^2 e^4}{n^2 h^2} \tag{3.12}$$

যেহেতু মোট শক্তির মান ঋণাত্মক, অতএব $n$ যত বড় হয় মোট শক্তি তত বেশী হয়। স্পষ্টতঃ ইলেকট্রন যখন ক্ষুদ্রতম ($n = 1$) কক্ষপথে থাকে তখন তার মোট শক্তি হয় ন্যূনতম।

ইলেকট্রনটি যখন $n_2$ ক্রমের কক্ষপথ থেকে সংক্রমণ করে $n_1$ ক্রমের কক্ষপথে যায় তখন তার মোটশক্তি $E_2$ থেকে পরিবর্তিত হয়ে $E_1$ হয়; (3.12) সমীকরণ থেকে পাওয়া যায়

$$E_1 = -\frac{2\pi^2 m Z^2 e^4}{n_1^2 h^2} \quad \text{এবং} \quad E_2 = -\frac{2\pi^2 m Z^2 e^4}{n_2^2 h^2}$$

যদি $n_2 > n_1$ হয়, তাহলে ইলেকট্রনের মোট প্রাথমিক শক্তি বেশী থাকে। কাজেই সংক্রমণের ফলে ইলেকট্রনের মোট শক্তি হ্রাস পায়। বোরের তৃতীয় অনুমান অনুযায়ী এই সংক্রমণের ফলে যে বিকিরণ নিঃসৃত হয় তার শক্তি হয়

$$h\nu = E_2 - E_1 = \frac{2\pi^2 m Z^2 e^4}{h^2}\left(\frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2}\right) \tag{3.13}$$

অতএব নিঃসৃত বিকিরণের কম্পাংক হয়

$$\nu = \frac{2\pi^2 m Z^2 e^4}{h^3}\left(\frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2}\right) \tag{3.14}$$

যদি এই বিকিরণের তরঙ্গদৈর্ঘ্য হয় $\lambda$, তাহলে আমরা লিখতে পারি $\nu\lambda = c =$ আলোকের বেগ। তরঙ্গ তত্ত্ব অনুযায়ী প্রতি সেকেন্ডে উৎস থেকে $\nu$ সংখ্যক তরঙ্গ নির্গত হয় এবং এই তরঙ্গরাজির এক প্রান্ত থেকে অন্য প্রান্ত পর্যন্ত বিস্তৃতি $c$ হয়। অতএব প্রতি একক দৈর্ঘ্যে পূর্ণ তরঙ্গের সংখ্যা $\nu/c$ হয়। এই সংখ্যাকে বলা হয় 'তরঙ্গ সংখ্যা' (Wave Number)। একে সাধারণতঃ $\bar{\nu}$ চিহ্ন দ্বারা নির্দেশ করা হয়। অতএব

$$\bar{\nu} = \frac{\nu}{c} = \frac{1}{\lambda} = \frac{2\pi^2 m Z^2 e^4}{ch^3}\left(\frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2}\right) \tag{3.15}$$

$\bar{\nu}$ সংখ্যাটির একক হচ্ছে দৈর্ঘ্যের এককের বিপরীত (Reciprocal); অর্থাৎ সি. জি. এস্. পদ্ধতিতে সেমি$^{-1}$ হয়। যদি লেখা যায়

$$R = \frac{2\pi^2 m e^4}{ch^3} \tag{3.16}$$

তাহলে (3·15) সমীকরণকে লেখা যায়

$$\bar{\nu} = R Z^2 \left(\frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2}\right) \tag{3.17}$$

$R$ সংখ্যাটিকে বলা হয় রিডবার্গ ধ্রুবক (Rydberg Constant)। বিভিন্ন সংখ্যার মান বসিয়ে সমীকরণ (3·16) থেকে পাওয়া যায় $R = 109{,}737$ সেমি$^{-1}$। (3·17) সমীকরণ থেকে হাইড্রোজেনের ক্ষেত্রে ($Z = 1$) আমরা পাই,

$$\bar{\nu} = R \left(\frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2}\right) \tag{3.18}$$

## 3. 6 : বর্ণালী শ্রেণীর উৎপত্তি

বোরের তত্ত্ব অনুযায়ী হাইড্রোজেন বা হাইড্রোজেন-সদৃশ পরমাণু নিঃসৃত বিকিরণের তরঙ্গ-সংখ্যার যে সমীকরণ (3·15) পাওয়া যায়, অনুরূপ একটি সমীকরণ বোরের তত্ত্ব প্রতিষ্ঠার বহু পূর্বে বামার (Balmer) নামক বিজ্ঞানী ১৮৮৩ খৃষ্টাব্দে হাইড্রোজেনের বর্ণালী বিশ্লেষণ পরীক্ষা থেকে আবিষ্কার করেছিলেন। তিনি দেখান যে হাই-ড্রোজেন মোক্ষণ নল (Discharge Tube) থেকে যে বিকিরণ নিঃসৃত হয়, তার অন্তর্গত দৃশ্যমান (Visible) বর্ণালী রেখাগুলির পরিমিত তরঙ্গ-

সংখ্যা সমূহ একটি মাত্র নির্দিষ্ট সমীকরণ দ্বারা প্রকাশ করা যায়। এই সমীকরণ হচ্ছে

$$\bar{\nu} = A\left(\frac{1}{4} - \frac{1}{m^2}\right) = A\left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{m^2}\right)$$

এখানে $A$ একটি ধ্রুবক। প্রতিটি বর্ণালী রেখার জন্য $m$ এর একটি নির্দিষ্ট পূর্ণ সংখ্যক মান আছে। স্পষ্টতঃ $m>2$ হতে হবে। অর্থাৎ $m=3, 4, 5,$ ইত্যাদি হবে। বর্ণালীমাপক যন্ত্রের সাহায্যে বর্ণালী রেখাগুলির তরঙ্গ-সংখ্যা নিরূপণ করলে $A$ ধ্রুবকটির মান পাওয়া যায়ঃ

$$A = 109,678 \text{ সেমি}^{-1}$$

এই মান বোরের তত্ত্ব থেকে নির্ণীত রিডবার্গ ধ্রুবকের ($R$) মানের খুব কাছাকাছি। এর থেকে হাইড্রোজেনের বর্ণালী ব্যাখ্যার জন্য উদ্ভাবিত বোরের কোয়ানটাম তত্ত্বের সত্যতা সুদৃঢ়ভাবে প্রমাণিত হয়। যেহেতু হাইড্রোজেন পরমাণু থেকে নিঃসৃত উপরোক্ত দৃশ্যমান বর্ণালী রেখাগুলির তরঙ্গ-সংখ্যা একটি মাত্র সমীকরণ দ্বারা প্রকাশ করা যায়, এদের বলা হয় 'বামার-শ্রেণীর বর্ণালী রেখা' অথবা কেবল 'বামার শ্রেণী' (Balmer Series)।

পরবর্তী কালে এইরূপ আরও অনেকগুলি বর্ণালী শ্রেণী হাইড্রোজেন পরমাণুর ক্ষেত্রে আবিষ্কৃত হয়েছে। এদের প্রত্যেকটির অন্তর্গত বিভিন্ন বর্ণালী রেখাসমূহ এক একটি নির্দিষ্ট সমীকরণ দ্বারা প্রকাশ করা যায়। যথা—

লাইম্যান (Lyman) শ্রেণীঃ

$$\bar{\nu} = R\left(\frac{1}{1^2} - \frac{1}{m^2}\right), \; m = 2, 3, 4, \ldots\ldots$$

এই শ্রেণীর বর্ণালী রেখাগুলি অতিবেগনী (Ultra Violet) অঞ্চলে পাওয়া যায়।

বামার (Balmer) শ্রেণীঃ

$$\bar{\nu} = R\left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{m^2}\right), \; m = 3, 4, 5, \ldots\ldots$$

পাশেন (Paschen) শ্রেণীঃ

$$\bar{\nu} = R\left(\frac{1}{3^2} - \frac{1}{m^2}\right), \; m = 4, 5, 6,$$

ব্রাকেট (Brackett) শ্রেণীঃ

$$\bar{\nu} = R\left(\frac{1}{4^2} - \frac{1}{m^2}\right),\ m = 5, 6, 7, \ldots\ldots$$

বোরের তত্ত্ব প্রতিষ্ঠিত হবার পর উপরোক্ত বর্ণালী শ্রেণীগুলির উৎপত্তি সহজেই বোঝা যায়। যদি হাইড্রোজেন পরমাণুর ইলেকট্রনটি $n_2 = 2$, 3, 4, প্রভৃতি বিভিন্ন প্রাথমিক স্থায়ী কক্ষপথ থেকে $n_1 = 1$ চরম (Final) স্থায়ী কক্ষপথে সংক্রমণ করে তাহলে যে বর্ণালী রেখাগুলি নিঃসৃত হয়

তাদের তরঙ্গ-সংখ্যা $R\left(\frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2}\right) = R\left(\frac{1}{1^2} - \frac{1}{n_2^2}\right)$ হয়।

স্পষ্টতঃ এই বর্ণালী রেখাগুলি লাইম্যান শ্রেণীভুক্ত হবে। আবার যদি ইলেকট্রনটি $n_2 = 3, 4, 5$, প্রভৃতি বিভিন্ন প্রাথমিক কক্ষপথ থেকে $n_1 = 2$ চরম কক্ষপথে সংক্রমণ করে, তাহলে নিঃসৃত রশ্মিগুলির তরঙ্গ-সংখ্যা

$\nu = R\left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n_2^2}\right)$ হয়। এই রেখাগুলি বামার শ্রেণীর অন্তর্গত।

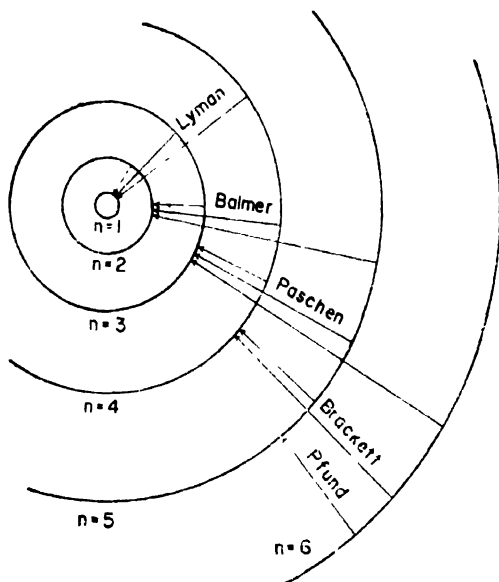
অনুরূপ ভাবে $n_2 = 4, 5, 6$, প্রভৃতি বিভিন্ন প্রাথমিক কক্ষপথ থেকে $n_1 = 3$ চরম কক্ষপথে সংক্রমণের ফলে পাশেন শ্রেণী, $n_2 = 5, 6, 7$, প্রভৃতি বিভিন্ন প্রাথমিক কক্ষপথ থেকে $n_1 = 4$ চরম কক্ষপথে সংক্রমণের ফলে ব্রাকেট শ্রেণী, ইত্যাদির উৎপত্তি হয়।

বোরের তত্ত্ব অনুযায়ী বিভিন্ন বর্ণালী শ্রেণীর উৎপত্তি (3·5) চিত্রে দেখান হয়েছে। এখানে ইলেকট্রনের বিভিন্ন কক্ষপথগুলি তাদের ব্যাসার্ধের নির্দিষ্ট অনুপাতে আঁকা হয়নি। আদি কক্ষপথগুলি থেকে চরম কক্ষপথে সংক্রমণ এক একটি তীর চিহ্ন দ্বারা নির্দেশ করা হয়েছে।

বোরের তত্ত্ব অনুযায়ী ইলেকট্রনের প্রতিটি কক্ষপথের একটি নির্দিষ্ট শক্তি আছে। সমীকরণ (3·12) থেকে এই শক্তির মান পাওয়া যায়

$$E_n = -RZ^2/n^2$$

হাইড্রোজেনের $(Z = 1)$, ক্ষেত্রে পাওয়া যায়ঃ

$$E_n = -R/n^2$$

চিত্র 3.5
বোর তত্ত্বানুযায়ী বিভিন্ন বর্ণালী শ্রেণীর উৎপত্তি।

(3·6) চিত্রে হাইড্রোজেনের ক্ষেত্রে বিভিন্ন কক্ষপথের মোট শক্তি কতকগুলি অনুভূমিক (Horizontal) রেখার দ্বারা নির্দেশ করা হয়েছে। এগুলিকে বলা হয় হাইড্রোজেন পরমাণুর 'শক্তিস্তর' (Energy Levels)। এই শক্তিস্তরগুলির শক্তির মানকে সাধারণতঃ বলা হয় 'পদ-মান' (Term Value)। (3·1) সারণীতে হাইড্রোজেনের বিভিন্ন শক্তিস্তরের গণনা করা শক্তির মান সন্নিবিষ্ট করা হয়েছে। সাধারণতঃ এই শক্তিকে ইলেকট্রন ভোল্ট (Electron Volt) নামক এককে প্রকাশিত করা হয়। এক ইলেকট্রন ভোল্ট (ই-ভো) পরিমাণ শক্তি হচ্ছে একটি ইলেকট্রনকে এক ভোল্ট বিভব প্রভেদের মধ্য দিয়ে নিয়ে যাবার জন্য কৃত কার্যের সমান।

স্পষ্টতঃ 1 ই-ভো = ইলেকট্রনীয় আধান $\times$ 1 ভোল্ট $= \dfrac{4\cdot8\times10^{-10}}{300}$

$= 1\cdot6\times10^{-12}$ আর্গ।

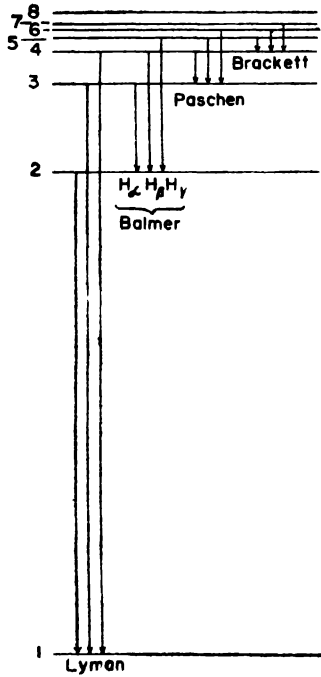
## সারণী — 3·1

### হাইড্রোজেনের বিভিন্ন শক্তিস্তরের শক্তির মান

| শক্তিস্তর ($n$) | শক্তি (ই-ভো) |
|---|---|
| 1 | −13·58 |
| 2 | − 3·394 |
| 3 | − 1·508 |
| 4 | − 0·849 |
| 5 | − 0·543 |
| 6 | − 0·377 |
| ∞ | 0 |

স্পষ্টতঃ দুটি শক্তিস্তরের পদ-মানের অন্তর ফল হবে একটি ইলেকট্রন যখন এক স্থায়ী কক্ষপথ থেকে অন্য কক্ষপথে সংক্রমণ করে তখন যে বিকিরণ নিঃসৃত হয় তার শক্তির সমান। বিভিন্ন শক্তিস্তরের মধ্যে ইলেকট্রনের এইরূপ সংক্রমণের ফলে বিভিন্ন বর্ণালী শ্রেণীর উৎপত্তি কী ভাবে হয় তা (3·6) চিত্রে কতকগুলি নিম্নমুখী উলম্ব (Vertical) তীর চিহ্ন দ্বারা নির্দেশ করা হয়েছে। শক্তি শোষণ করে ইলেকট্রন যদি নিম্নতর শক্তিস্তর থেকে উচ্চতর শক্তিস্তরে সংক্রমণ করে, তাহলে সংক্রমণগুলি ঊর্ধ্বমুখী উল্লম্ব তীর চিহ্ন দ্বারা নির্দেশ করা যায়। এই চিত্র থেকে দেখা যায় যে কোয়ানটাম সংখ্যা $n$ যত বাড়তে থাকে শক্তিস্তরগুলি তত উপরের দিকে এবং পরস্পরের বেশী কাছাকাছি অবস্থিত থাকে। $n$ যখন খুব উচ্চমান সম্পন্ন হয়, তখন শক্তিস্তরগুলির মধ্যেকার ব্যবধান বোঝা কঠিন হয়। যখন $n = \infty$ হয়, তখন শক্তির মান শূন্য হয় $(E = 0)$। স্পষ্টতঃ ইলেকট্রনটি তখন কেন্দ্রক থেকে অসীম দূরত্বে চলে যায়; অর্থাৎ সেটি তখন পরমাণুর বন্ধন কাটিয়ে মুক্ত হয়ে যায়। (3·12) সমীকরণের সাহায্যে হাইড্রোজেন পরমাণুর ক্ষুদ্রতম কক্ষপথ থেকে ইলেকট্রনটিকে সম্পূর্ণ বিচ্ছিন্ন করবার জন্য প্রয়োজনীয় শক্তির মান পাওয়া যায়,

$$I = E_\infty - E_1 = \frac{2\pi^2 me^4}{h^2} = ch\,R$$

$c$, $h$ এবং $R$ সংখ্যাগুলির মান থেকে $I$ নিরূপণ করা সম্ভব।

চিত্র 3.6
হাইড্রোজেন বর্ণালী উৎপত্তির শক্তিস্তর চিত্র।

স্বাভাবিক অবস্থায় হাইড্রোজেন পরমাণুতে ইলেকট্রনটি $n=1$ শক্তি-স্তরে (অর্থাৎ ক্ষুদ্রতম কক্ষপথে) অবস্থান করে। কারণ এই স্তরের শক্তি ন্যূনতম হয়। পরমাণুর এই অবস্থাকে বলা হয় তার 'স্বাভাবিক-অবস্থা' বা 'ভৌম-অবস্থা' (Normal State or Ground State)। এই অবস্থা থেকে উত্তেজিত হয়ে উচ্চতর শক্তিস্তরে (অর্থাৎ বৃহত্তর কক্ষপথে) যেতে হলে ইলেকট্রনটিকে শক্তি শোষণ করতে হয়। এই শোষিত শক্তির পরিমাণ যদি $I=chR$ অথবা ততোধিক হয়, তাহলে ইলেকট্রনটি পরমাণু থেকে সম্পূর্ণ বিচ্ছিন্ন হয়ে যায় এবং পরমাণুটি আয়নিত হয়। এই শক্তিকে হাইড্রোজেন পরমাণুর 'আয়নন-শক্তি' (Ionization Energy) বলা হয়। এর মান হচ্ছে $I=13 \cdot 58$ ই-ভো।

যদি স্বাভাবিক অবস্থায় হাইড্রোজেন পরমাণুর ইলেকট্রনটি $13 \cdot 58$ ই-ভো

অপেক্ষা অধিকতর শক্তি শোষণ করে, তাহলে মুক্ত হবার পর এই অতিরিক্ত শক্তি ইলেকট্রনটি গতিশক্তি হিসাবে পায়। উদাহরণ স্বরূপ যদি শোষিত শক্তির পরিমাণ 20 ই-ভো হয়, তাহলে মুক্ত হবার পর ইলেকট্রনটির গতিশক্তি হবে $20 - 13 \cdot 58 = 6 \cdot 42$ ই-ভো। যদি শোষিত শক্তি ঠিক 13·58 ই-ভো হয়, তাহলে ইলেকট্রনটি পরমাণু থেকে মুক্ত হবে, কিন্তু তার কোন গতিশক্তি থাকবে না।

এখানে উল্লেখযোগ্য যে মুক্ত অবস্থায় ইলেকট্রনটি যে কোন শক্তি পেতে পারে; তখন আর শক্তি 'কোয়ানটায়িত' হয় না। কাজেই তখন এই শক্তির মান কতকগুলি অবচ্ছিন্ন (Discrete) অনুভূমিক রেখার দ্বারা নির্দেশিত করার প্রয়োজন হয় না। সেইজন্য মুক্ত অবস্থার ইলেকট্রনের সম্ভাব্য শক্তিস্তরগুলিকে $n = \infty$ স্তরের উপরে নিরবচ্ছিন্ন ভাবে দেখান হয়। শক্তিস্তরের এই অঞ্চলকে বলা যেতে পারে 'নিরবচ্ছিন্ন অঞ্চল' (Continuum)।

হাইড্রোজেন মোক্ষণ নলের মধ্যে অনেক মুক্ত ইলেকট্রন থাকে। উচ্চ বিভব প্রভেদের প্রভাবে এরা উচ্চ বেগ অর্জন করে। এদের সংগে সংঘাতের ফলে হাইড্রোজেন পরমাণুতে স্বাভাবিক অবস্থায় (অর্থাৎ নিম্নতম শক্তিস্তরে) অবস্থিত ইলেকট্রনটি শক্তি সংগ্রহ করে উত্তেজিত অবস্থায় (Excited State) উন্নীত হয়। কিন্তু উত্তেজিত অবস্থায় তারা বেশীক্ষণ থাকতে পারে না। $10^{-8}$ সেকেণ্ডের মধ্যে তারা নিম্নতর শক্তিস্তরে ফিরে আসে। এই সংক্রমণের সময়ে তারা বিভিন্ন শক্তি সম্পন্ন বিকিরণ নিঃসৃত করে। এই ভাবে হাইড্রোজেন বর্ণালীর সৃষ্টি হয়। অন্যান্য হাইড্রোজেন সদৃশ পরমাণুর বর্ণালীও অনুরূপভাবে সৃষ্ট হয়।

তড়িৎ-মোক্ষণ ছাড়াও অন্য উপায়ে পরমাণুর ইলেকট্রনকে স্বাভাবিক অবস্থা থেকে উত্তেজিত অবস্থায় নিয়ে যাওয়া যায়। যথা তাপ প্রয়োগ করলে তাপশক্তি সংগ্রহ করে কিংবা আলোকপাত করলে আলোক-শক্তি শোষণ করে ইলেকট্রনটি স্বাভাবিক অবস্থা থেকে উত্তেজিত অবস্থায় সংক্রমণ করতে পারে। (3·2) সারণীতে হাইড্রোজেনের বিভিন্ন বর্ণালী শ্রেণীর কয়েকটি বর্ণালী রেখার তরঙ্গ-সংখ্যা এবং তরঙ্গদৈর্ঘ্য সন্নিবিষ্ট করা হয়েছে। এখানে উল্লেখযোগ্য যে বামার শ্রেণীর বর্ণালী রেখাগুলিকে $H_\alpha$, $H_\beta$ $H_\gamma$,...... প্রভৃতি প্রতীকচিহ্ন দ্বারা নির্দেশ করা হয়; (3·2) সারণীতেও সেইভাবে দেখান হয়েছে।

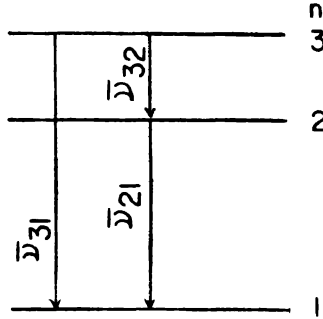
**সারণী — 3.2**

| বর্ণালী শ্রেণী | $n_2$ | $\bar{\nu}$ (সেমি)$^{-1}$ | $\lambda$ (অ্যাংস্ট্রম) |
|---|---|---|---|
| লাইম্যান | 2 | 82,258 | 1216·0 |
| ($n_1 = 1$) | 3 | 97,491 | 1025·8 |
| | 4 | 102,823 | 972·5 |
| | 5 | 105,291 | 949·5 |
| | ∞ | 109,678 | 911·8 |
| বামার | 3 | 15,233 | 6562·8 ($H_\alpha$) |
| ($n_1 = 2$) | 4 | 20,565 | 4861·3 ($H_\beta$) |
| | 5 | 23,032 | 4340·5 ($H_\gamma$) |
| | 6 | 24,373 | 4101·7 ($H_\delta$) |
| | ∞ | 27,420 | 3647·0 |
| পাশেন | 4 | 5,331 | 18,756 |
| ($n_1 = 3$) | 5 | 7,799 | 12.821 |
| | 6 | 9,139 | 10,939 |
| | 7 | 9,948 | 10,052 |
| | ∞ | 12,186 | 8,806 |
| ব্রাকেট | 5 | 2,468 | 4·05 মাইক্রন* |
| ($n_1 = 4$) | 6 | 3,808 | 2·63 ,, |
| | 7 | 4,617 | 2·16 ,, |
| | 8 | 5,141 | 1·94 ,, |
| | ∞ | 6,855 | 1·46 ,, |

(3·2) সারণী থেকে দেখা যায় যে লাইম্যান শ্রেণীর বর্ণালী রেখাগুলি অতিবেগনী (Ultra Violet) অঞ্চলে অবস্থিত থাকে। অপরপক্ষে বামার শ্রেণীভুক্ত রেখাগুলি দৃশ্যমান অঞ্চলে অবস্থিত থাকে। অন্যান্য শ্রেণীর রেখাগুলি অবলোহিত (Infra red) অঞ্চলে অবস্থিত থাকে।

### 3. 7 : রিৎসের সমবায় মতবাদ

(3·7) চিত্র থেকে আমরা দেখি যে একটি হাইড্রোজেন পরমাণু যদি উত্তেজিত অবস্থায় $n = 3$ শক্তিস্তরে থাকে তাহলে সেটি শক্তি বিকিরণ করে প্রথমে $n = 2$ স্তরে ও তারপরে $n = 2$ স্তর থেকে $n = 1$ স্তরে

* 1 মাইক্রন $= 10^{-4}$ সেমি $= 10{,}000$ অ্যাংস্ট্রম।

চিত্র 3.7
রিৎস সমবায় মতবাদের চিত্ররূপ।

সংক্রমণ করতে পারে। অথবা সেটি এক লাফে $n = 3$ স্তর থেকে $n = 1$ স্তরেও সংক্রমণ করতে পারে। প্রথম ক্ষেত্রে দুটি বিভিন্ন তরঙ্গ-সংখ্যার বর্ণালী রেখা নিঃসৃত হয়। মনে করা যাক যে এদের মান যথাক্রমে $\bar{\nu}_{32}$ ও $\bar{\nu}_{21}$ হয়। দ্বিতীয় ক্ষেত্রে একটি মাত্র বর্ণালী রেখা নিঃসৃত হবে, যার তরঙ্গসংখ্যা $\bar{\nu}_{31}$ ধরা যাক। স্পষ্টতঃ

$$\bar{\nu}_{31} = \bar{\nu}_{32} + \bar{\nu}_{21}$$

অনুরূপে $n = 4$ শক্তিস্তর থেকে বিভিন্ন নিম্নতর শক্তিস্তরে ($n = 3$, 2, 1) যদি সংক্রমণ হয়, তাহলে আমরা পাই

$$\bar{\nu}_{41} = \bar{\nu}_{43} + \bar{\nu}_{31} = \bar{\nu}_{42} + \bar{\nu}_{21} = \bar{\nu}_{43} + \bar{\nu}_{32} + \bar{\nu}_{21}$$

কোন পরমাণু থেকে নিঃসৃত বিশেষ কতকগুলি বর্ণালী রেখার তরঙ্গ-সংখ্যা সমূহকে যোগ করলে যে অন্য একটি নিঃসৃত বর্ণালী রেখার তরঙ্গ-সংখ্যা পাওয়া যায় তা প্রথম লক্ষ্য করেন রিৎস্ (Ritz) নামক বিজ্ঞানী, বোরের তত্ত্ব আবিষ্কারের বহু পূর্বে। তিনি তরঙ্গ-সংখ্যাগুলির পরিমিত মানের ভিত্তিতে এই তথ্য আবিষ্কার করেন। তাঁর এই আবিষ্কারকে বলা হয় রিৎস্-সমবায় মতবাদ (Ritz Combination Principle)। উপরের আলোচনা থেকে দেখা যায় যে বোরের তত্ত্ব থেকে এর সহজ ব্যাখ্যা সম্ভব।

### 3. 8 : বর্ণালীর উপরে কেন্দ্রকের গতির প্রভাব

আমরা পূর্বেই দেখেছি যে আয়নিত হিলিয়াম $He^+$ একটি হাইড্রোজেন-সদৃশ পরমাণু, যার কেন্দ্রকের আধান হচ্ছে $(+2e)$। অতএব এক্ষেত্রে

সমীকরণ (3·12) থেকে $n$ ক্রমের শক্তিস্তরের শক্তির মান হয় ($Z = 2$)ঃ

$$E_n = -\frac{2\pi^2 m Z^2 e^4}{n^2h^2} = -\frac{8\pi^2 m e^4}{n^2h^2} .$$

অর্থাৎ আয়নিত হিলিয়ামের শক্তিস্তরগুলির শক্তি হাইড্রোজেনের তুলনায় চারগুণ বেশী হয়। যদি $n = n_2$ প্রাথমিক শক্তিস্তর থেকে $n = n_1$ চরম শক্তিস্তরে ইলেকট্রনটির সংক্রমণ হয় তাহলে যে বর্ণালী রেখা নিঃসৃত হয় তার তরঙ্গ-সংখ্যা হয়

$$\bar{\nu} = \frac{8\pi^2 m e^4}{ch^3}\left(\frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2}\right)$$

হাইড্রোজেনের মত এক্ষেত্রেও $n_1$ এর একটি নির্দিষ্ট পূর্ণসংখ্যক মান ধরে নিয়ে $n_2$ সমান বিভিন্ন পূর্ণ সংখ্যা ধরলে এক একটি বর্ণালী শ্রেণী পাওয়া যায়। (3·8) চিত্রে এইরূপ একটি বর্ণালী দেখান হয়েছে।
উদাহরণ স্বরূপ $n_2 = 5, 6, 7,$ প্রভৃতি শক্তিস্তর থেকে $n_1 = 4$ স্তরে সংক্রমণের ফলে উৎপন্ন বর্ণালী শ্রেণীকে বলা হয় 'পিকারিং শ্রেণী' (Pickering Series)। উপরের সমীকরণ থেকে এই শ্রেণীভুক্ত বর্ণালী রেখাগুলির তরঙ্গ-সংখ্যা হওয়া উচিত

$$\bar{\nu} = \frac{8\pi^2 m e^4}{ch^3}\left(\frac{1}{4^2} - \frac{1}{n_2^2}\right) \qquad n_2 = 5, 6, 7, 8, \ldots$$

$$= \frac{2\pi^2 m e^4}{ch^3}\left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2}\right) \qquad n = n_2/2$$

স্পষ্টতঃ দেখা যায় যে যদি $n_2$ একটি জোড় সংখ্যা হয়, যথা $n_2 = 6, 8, 10,$ প্রভৃতি, তাহলে $n$ একটি পূর্ণসংখ্যা হবে; অর্থাৎ $n = 3, 4, 5,$ প্রভৃতি হবে। সুতরাং পিকারিং শ্রেণীর এই রকম একটি অন্তর বিভিন্ন বর্ণালী রেখার তরঙ্গ-সংখ্যা হাইড্রোজেনের বামার শ্রেণীর বর্ণালী রেখাগুলির তরঙ্গ-সংখ্যার ঠিক সমান হওয়া উচিত। পরীক্ষাগারে পরিমাপ করে দেখা যায় যে এরা পরস্পরের প্রায় সমান হয়, কিন্তু এদের মধ্যে খুব অল্প পার্থক্যও লক্ষ্য করা যায়। বোরের তত্ত্ব অনুযায়ী কিন্তু এইরূপ পার্থক্য থাকবার কথা নয়।

এই ব্যবধানের কারণ হচ্ছে হাইড্রোজেন ও হিলিয়ামের কেন্দ্রক দুটির ভরের পার্থক্য। বোরের তত্ত্বে অনুমান করা হয় যে পরমাণু কেন্দ্রকটির ভর অসীম হয়, যার ফলে সেটি সম্পূর্ণ স্থির থাকে। কিন্তু বস্তুতঃ এই অনুমান ঠিক নয়। হাইড্রোজেনের কেন্দ্রকের ভর ইলেকট্রনের ভরের প্রায়

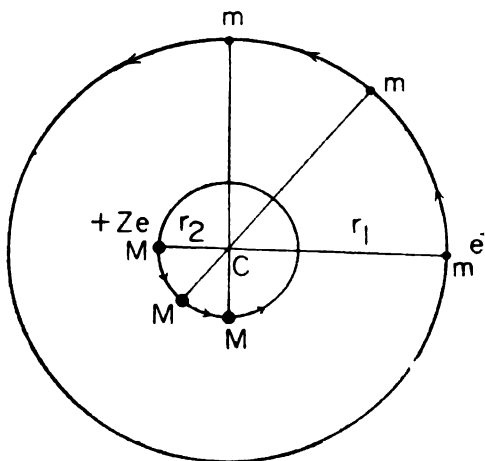
←Limit

IONIZED HELIUM
Extreme Ultra Violet Series

228 237 243 256 —λ→ 303

চিত্র 3·৪

আয়নিত হিলিয়ামের বর্ণালী

1836 গুণ বেশী হয়। হিলিয়াম কেন্দ্রকের ভর এর প্রায় চারগুণ। ইলেকট্রনের ভরের তুলনায় এই ভরগুলি খুব বেশী হলেও এরা অসীম নয়। ফলে ইলেকট্রন যেমন আপন কক্ষপথে আবর্তন করতে থাকে, কেন্দ্রকটিও সেই রকম একটি ক্ষুদ্র কক্ষপথে আবর্তন করে; দুটিই সাধারণ ভর-কেন্দ্রকে (Centre of Mass) ঘিরে আবর্তন করে। (3·9) চিত্রে ইলেকট্রন (m) ও কেন্দ্রকের (M) সাধারণ ভর-কেন্দ্র C বিন্দুকে

চিত্র 3.9
ভরকেন্দ্রকে বেষ্টন করে সীমিত ভর সম্পন্ন কেন্দ্রক এবং ইলেকট্রনের আবর্তন গতি।

ঘিরে এদের এই আবর্তন দেখান হয়েছে। যদি ইলেকট্রনের ভর ও কক্ষপথের ব্যাসার্ধ হয় যথাক্রমে $m$ ও $r_1$ এবং কেন্দ্রকের ভর ও কক্ষপথের ব্যাসার্ধ হয় যথাক্রমে $M$ ও $r_2$ তাহলে ভর-কেন্দ্রের সংজ্ঞা অনুযায়ী লেখা যায়

$$m r_1 = M r_2$$

$$r_2 = \frac{m}{M} r_1$$

যদি কেন্দ্রক ও ইলেকট্রনের মধ্যের দূরত্ব হয় $r$, তাহলে আমরা পাই

$$r = r_1 + r_2 = r_1 (1 + m/M)$$

ইলেকট্রন এবং কেন্দ্রক উভয়েই সমান কৌণিক বেগ ($\omega$) সহকারে ভর-

কেন্দ্রকে ঘিরে আবর্তন করে। অতএব তাদের মোট কৌণিক ভরবেগ (Angular Momentum) হয়ঃ

$$p = m r_1^2\omega + M r_2^2\omega$$

$$= m r_1^2\omega (1+m/M) = \frac{m r^2 \omega}{1+m/M}$$

মনে করা যাক $\mu = \frac{mM}{m+M} = \frac{m}{1+m/M}$ ; $\mu$ কে বলা হয় 'পরিণত ভর' (Reduced mass)। তাহলে আমরা লিখতে পারি

$$p = \mu r^2 \omega$$

অর্থাৎ মনে করা যেতে পারে যে কেন্দ্রকের গতির জন্য ইলেকট্রনটির ভর যেন পরিবর্তিত হয়ে $m$ থেকে $\mu$ হয়ে যায় এবং সেটি যেন একটি অসীম ভর সম্পন্ন কেন্দ্রককে ঘিরে $r$ ব্যাসার্ধের বৃত্তাকার কক্ষপথে আবর্তিত হয়। বোরের প্রথম অনুমান থেকে আমরা পাই

$$\mu r^2 \omega = n \frac{h}{2\pi} \tag{3.19}$$

$n = 1, 2, 3, 4$ ইত্যাদি।

ইলেকট্রনের ও কেন্দ্রকের উপর ক্রিয়াশীল বল হচ্ছে

$$Z e^2/r^2 = m \omega^2 r_1 = M \omega^2 r_2$$

অর্থাৎ $$Z e^2/r^2 = \mu \omega^2 r \tag{3.20}$$

ইলেকট্রন এবং কেন্দ্রকের সম্মিলিত গতিশক্তি হচ্ছে

$$E_k = \tfrac{1}{2} m r_1^2 \omega^2 + \tfrac{1}{2} M r_2^2 \omega^2 = \tfrac{1}{2} \mu r^2 \omega^2 = \frac{1}{2} \frac{Ze^2}{r}$$

স্থিতিশক্তি হচ্ছে $V = -Ze^2/r$

অতএব মোট শক্তির পরিমাণ হচ্ছে

$$E = E_k + V = -\frac{Ze^2}{2r} \tag{3.21}$$

সমীকরণ (3·19), (3·20) এবং (3·21) থেকে পাওয়া যায়

$$E = -\frac{2\pi^2 \mu Z^2 e^4}{n^2 h^2} \tag{3.22}$$

(3·12) সমীকরণের সংগে তুলনা করলে দেখা যায় যে কেন্দ্রকের গতির জন্য মোট শক্তির পরিবর্তন ঘটে (3·22) সমীকরণে ইলেকট্রনের ভর $m$ এর

বদলে পরিণত ভর $\mu$ বসানর জন্য। স্পষ্টতঃ এক্ষেত্রে রিডবার্গ ধ্রুবকের নূতন মান হবে

$$R = \frac{2\pi^2 \mu e^4}{ch^3} = \frac{R_\infty}{1+m/M} \tag{3.23}$$

এখানে $R_\infty$ হচ্ছে অসীম ভর সম্পন্ন কেন্দ্রকের ক্ষেত্রে রিডবার্গ-ধ্রুবকের মান। সমীকরণ (3·16) অনুযায়ী $R_\infty = 2\pi^2 me^4/ch^3$ পাওয়া যায়। বর্তমান ক্ষেত্রে দুটি বিভিন্ন শক্তিস্তরের মধ্যে সংক্রমণের ফলে নিঃসৃত বর্ণালী রেখার তরঙ্গ-সংখ্যা হবে

$$\bar{\nu} = RZ^2\left(\frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2}\right) = \frac{R_\infty Z^2}{1+m/M}\left(\frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2}\right) \tag{3.24}$$

সমীকরণ (3·23) থেকে দেখা যায় যে রিডবার্গ ধ্রুবক $R$ কেন্দ্রকের ভরের উপর নির্ভরশীল। যেহেতু $m << M$, অতএব কেন্দ্রকের গতি জনিত রিডবার্গ ধ্রুবকের এই পরিবর্তন খুব বেশী হয় না। বিভিন্ন সংখ্যার মান বসালে হাইড্রোজেন এবং আয়নিত হিলিয়ামের ক্ষেত্রে আমরা পাই

$R_{H} = 109{,}677$ সেমি$^{-1}$ এবং $R_{He} = 109{,}722$ সেমি$^{-1}$

(3·6) অনুচ্ছেদে প্রদত্ত হাইড্রোজেনের জন্য পরীক্ষালব্ধ রিডবার্গ ধ্রুবকের মানের (109,678 সেমি$^{-1}$) সংগে উপরোক্ত মানের খুব ভাল সংগতি পাওয়া যায়। হিলিয়ামের ক্ষেত্রে পরীক্ষালব্ধ রিডবার্গ ধ্রুবকের মান উপরে প্রদত্ত মানের সংগে সম্পূর্ণ মিলে যায়। এর থেকে বোরের তত্ত্বের সত্যতা আরও দৃঢ় ভাবে প্রমাণিত হয়।

ইলেকট্রনের 'পরিণত ভর' ($\mu$) তার প্রকৃত ভর ($m$) অপেক্ষা কম হওয়ার জন্য কেন্দ্রক যত ভারী হয় রিডবার্গ ধ্রুবক তত বেশী হয়। ফলে পিকারিং শ্রেণীভুক্ত হিলিয়ামের বর্ণালী রেখাগুলির তরঙ্গ-সংখ্যা বামার শ্রেণীভুক্ত হাইড্রোজেনের অনুরূপ বর্ণালী রেখাগুলির তরঙ্গ-সংখ্যা অপেক্ষা অল্প বেশী হয়। পরীক্ষার দ্বারা এই সিদ্ধান্ত সমর্থিত হয়।

## 3. 9 : হাইড্রোজেনের ভারী আইসোটোপ ডয়টেরিয়াম

প্রাকৃতিক হাইড্রোজেনের মধ্যে দুরকম পরমাণু দেখতে পাওয়া যায়। এদের পরমাণবিক ভর (Atomic Mass) হচ্ছে যথাক্রমে প্রায় 1 এবং 2 $a.m.u$। অর্থাৎ হাইড্রোজেনের দুটি আইসোটোপ আছে। পরমাণবিক ভর 2 সম্পন্ন হাইড্রোজেনকে বলা হয় 'ভারী-হাইড্রোজেন' (Heavy Hydrogen) বা 'ডয়টেরিয়াম' (Deuterium)। এর কেন্দ্রককে বলা হয় 'ডয়টেরন' (Deuteron)। দুই প্রকার হাইড্রোজেনের রাসায়নিক গুণাবলী

অভিন্ন। উভয়েরই পরমাণুতে একটি মাত্র ইলেকট্রন আবর্তন করে। বোরের তত্ত্ব অনুযায়ী এই দুই বিভিন্ন প্রকার হাইড্রোজেনের বর্ণালী রেখাগুলির তরঙ্গদৈর্ঘ্য এবং তরঙ্গ-সংখ্যার মধ্যে অল্প পার্থক্য থাকবে; কারণ তাদের রিডবার্গ ধ্রুবকের মান পৃথক হবেঃ

$$R_{\mathrm{H}} = \frac{R_\infty}{1+m/M_{\mathrm{H}}} \quad \text{এবং} \quad R_{\mathrm{D}} = \frac{R_\infty}{1+m/M_{\mathrm{D}}}$$

যেহেতু ভারী হাইড্রোজেনের পরমাণবিক ভর $M_{\mathrm{D}} \approx 2M_{\mathrm{H}}$, অতএব $R_{\mathrm{H}}$ অপেক্ষা $R_{\mathrm{D}}$ সংখ্যাটি অল্প বড় হবে। গণনা করে পাওয়া যায় $R_{\mathrm{D}} =$ 109,707 সেমি$^{-1}$। কাজেই ডয়টেরিয়াম কর্তৃক নিঃসৃত বর্ণালী রেখাগুলির তরঙ্গ-সংখ্যা সাধারণ হাইড্রোজেনের অনুরূপ বর্ণালী রেখার তরঙ্গ-সংখ্যা থেকে অল্প বেশী হবে।

ইউরে, ব্রিকওয়েডে ও মার্ফি (Urey, Brickwedde and Murphy) নামক তিনজন আমেরিকান বিজ্ঞানী ১৯৩১ সালে প্রথম লক্ষ্য করেন যে হাইড্রোজেনের বর্ণালী রেখাগুলির প্রত্যেকটির খুব কাছাকাছি আর একটি করে রেখা থাকে। প্রথমটির তীব্রতা খুব বেশী, অন্যটি খুব ক্ষীণ। এর থেকে তাঁরা সিদ্ধান্ত করেন যে হাইড্রোজেনের দুটি আইসোটোপ আছে। পাশাপাশি অবস্থিত দুটি বর্ণালী রেখার তরঙ্গ-সংখ্যার ব্যবধান থেকে তাঁরা দেখান যে ক্ষীণতর বর্ণালী রেখা উৎপত্তি কারক আইসোটোপটির পরমাণবিক ভর অন্যটির দ্বিগুণ হওয়া উচিত। এর বর্ণালী রেখাগুলির ক্ষীণতা থেকে প্রমাণিত হয় যে প্রাকৃতিক হাইড্রোজেনে এর অনুপাত খুব কম। পরে উন্নততর পদ্ধতিতে পরিমাপ করে জানা যায় যে প্রাকৃতিক হাইড্রোজেনে ডয়টেরিয়ামের অনুপাত হচ্ছে মাত্র সাত হাজার ভাগের এক ভাগ; (H — 99·985%; D — 0·015%)।

হাইড্রোজেন এবং ডয়টেরিয়ামের বর্ণালী রেখাগুলির তরঙ্গদৈর্ঘ্যের পার্থক্য সহজেই নির্ণয় করা যায়।

$$\lambda_{\mathrm{H}} = \frac{1}{\nu_{\mathrm{H}}} = \frac{1}{R_{\mathrm{H}}\left(\frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2}\right)} = \frac{1+m/M_{\mathrm{H}}}{R_\infty\left(\frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2}\right)}$$

$$\lambda_{\mathrm{D}} = \frac{1}{\nu_{\mathrm{D}}} = \frac{1}{R_{\mathrm{D}}\left(\frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2}\right)} = \frac{1+m/M_{\mathrm{D}}}{R_\infty\left(\frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2}\right)}$$

$$\Delta\lambda = \lambda_{\mathrm{H}} - \lambda_{\mathrm{D}} = \frac{m/M_{\mathrm{H}} - m/M_{\mathrm{D}}}{R_\infty\left(\frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2}\right)}$$

যেহেতু $m/M_H$ বা $m/M_D$ খুব ক্ষুদ্র সংখ্যা, অতএব উপরের সমীকরণের লবটিকে (Denominator) $\nu_H$ বা $1/\lambda_H$ এর সমান ধরা যায়। আবার যেহেতু $M_D$ সংখ্যাটি $M_H$ এর প্রায় দ্বিগুণ, অতএব লেখা যায়

$$\Delta \lambda = \lambda_H \cdot \frac{m}{2M_H} = \frac{\lambda_H}{3672}$$

বামার শ্রেণীর $H_\beta$- $(n_2 = 4 \to n_1 = 2)$ বর্ণালী রেখার তরঙ্গদৈর্ঘ্য হচ্ছে 4681 অ্যাংস্ট্রম। অতএব উপরের সমীকরণ অনুযায়ী হাইড্রোজেন ও ডয়টেরিয়ামের $H_\beta$ বর্ণালী রেখাদুটির তরঙ্গদৈর্ঘ্যের পার্থক্য হবে 1·28 অ্যাং। বস্তুতঃ ইউরে ও তাঁর সহযোগীগণ এই তরঙ্গদৈর্ঘ্য ব্যবধান পরিমাপ করেই ডয়টেরিয়াম আইসোটোপের অস্তিত্ব আবিষ্কার করেন।

### 3. 10 : বোরের সাদৃশ্য তত্ত্ব

বোরের হাইড্রোজেন পরমাণুর তত্ত্ব সনাতন বলবিদ্যা (Classical Mechanics) এবং সনাতন তড়িৎচুম্বকীয় তত্ত্বের (Classical Electromagnetic Theory) পরিপন্থী, একথা পূর্বেই বলা হয়েছে। জার্মান বিজ্ঞানী ম্যাক্স প্ল্যাংক ১৯০০ সালে কৃষ্ণ বস্তুর বিকিরণ (Black Body Radiation) সম্বন্ধে যে তত্ত্ব উদ্ভাবিত করেন তাতেই সর্বপ্রথম কোয়ানটাম মতবাদ অনুপ্রবেশ করান হয়। পরমাণবিক আকারের স্পন্দনশীল কণিকাগুলি যখন তড়িৎচুম্বকীয় বিকিরণের সংগে শক্তি বিনিময় করে তখন সেই শক্তির যে কোন মান সম্ভব নয়; এই শক্তিকে একটি মূল এককের পূর্ণ গুণিতক হতে হবে, এই ছিল প্ল্যাংকের নূতন তত্ত্বের ভিত্তি, যা ছিল সনাতন পদার্থবিদ্যালব্ধ মতবাদের পরিপন্থী। প্ল্যাংকের মতে শক্তির এই মূল এককের মান হচ্ছে $h\nu$ এবং একে বলা হয় শক্তির কোয়ানটাম (Quantum of Energy)। প্ল্যাংকের পর আইনষ্টাইন ১৯০৫ সালে আলোকতাড়িত ক্রিয়া (Photo Electric Effect) সম্পর্কিত কতকগুলি পরীক্ষালব্ধ তথ্য ব্যাখ্যা করতে গিয়ে আবার এই কোয়ানটাম মতবাদের আশ্রয় নেন (চতুর্থ পরিচ্ছেদ দ্রষ্টব্য)। এঁরা যে কোয়ানটাম মতবাদ পদার্থবিদ্যার বিভিন্ন বিভাগে অনুপ্রবেশ করান তা ছিল অনুভূতিমূলক (Empirical)। এরপর বোর যখন হাইড্রোজেন পরমাণুর তত্ত্ব উদ্ভাবিত করেন তখন তিনি তাঁর পূর্বসূরীগণ প্রদর্শিত পথ অবলম্বন করে কোয়ানটাম মতবাদের আশ্রয় নেন। আসলে তিনিও কতকগুলি অনুভূতিমূলক অনুমান থেকে তাঁর তত্ত্বটি গড়ে তোলেন। এখন প্রশ্ন হতে পারে যে পরমাণুর মধ্যে ইলেকট্রনের গতি ঠিকমত বুঝতে হলে সনাতন পদার্থবিদ্যাকে কী ভাবে পরিবর্তিত করা দরকার? পদার্থবিদ্যার সনাতন সূত্রগুলির সাহায্যে

আমাদের পারিপার্শ্বিকের সর্ব প্রকার বস্তুর গতি বোঝা যায়। এমন কী অণু বা পরমাণুর সামগ্রিক গতিও এর সাহায্যে বোঝা সম্ভব। বস্তুতঃ পদার্থের গতীয় তত্ত্ব (Kinetic Theory) সনাতন বলবিদ্যার ভিত্তিতেই গড়ে উঠেছে। কাজেই পরমাণবিক কণিকা সমূহের গতি সম্বন্ধে পদার্থ বিদ্যার নূতন যে তত্ত্ব গড়ে তুলতে হবে তা এমন হওয়া দরকার যে উপরোক্ত বিভিন্ন ক্ষেত্রে সেই তত্ত্ব প্রয়োগ করলে যেন সনাতন বলবিদ্যার সূত্রলব্ধ সিদ্ধান্তগুলি পাওয়া যায়। আমরা দেখেছি যে যখন কোয়ানটাম সংখ্যা $n$ খুব বড় হয় তখন ইলেকট্রনের কক্ষপথের ব্যাসার্ধ খুব বড় হয়; এইরূপ বৃহদায়তন কক্ষপথের ক্ষেত্রে পদার্থবিদ্যার সনাতন তত্ত্বগুলি প্রয়োগ করলেও সঠিক সিদ্ধান্ত পাওয়া উচিত। অর্থাৎ বোর কর্তৃক উদ্ভাবিত কোয়ানটাম তত্ত্বের সিদ্ধান্ত খুব বৃহৎ কোয়ানটাম সংখ্যার ক্ষেত্রে সনাতন পদার্থবিদ্যালব্ধ সিদ্ধান্ত থেকে অভিন্ন হওয়া উচিত। একেই বলা হয় 'বোরের সাদৃশ্য তত্ত্ব' (Bohr's Correspondence Principle)।

ইতিপূর্বে (3·2) অনুচ্ছেদে আমরা দেখেছি যে সনাতন তড়িৎচুম্বকীয় তত্ত্ব অনুযায়ী বৃত্তপথে আবর্তনশীল আহিত কণিকা যে বিকিরণ নিঃসৃত করে তার কম্পাংক কণিকাটির আবর্তন কম্পাংকের সমান। বোরের তত্ত্ব থেকে $n$ ক্রমের কক্ষপথে ইলেকট্রনের আবর্তন কম্পাংক ($f$) প্রতিপন্ন করা যায়। সমীকরণ (3·4) ও (3·5) থেকে হাইড্রোজেনের ক্ষেত্রে ($Z=1$) আমরা পাই

$$f = \frac{v}{2\pi r} = \frac{4\pi^2 m e^4}{n^3 h^3} \tag{3.25}$$

বোরের তত্ত্ব অনুযায়ী $(n+1)$ ক্রমের কক্ষপথ থেকে $n$ ক্রমের কক্ষপথে ইলেকট্রন সংক্রমণের ফলে নিঃসৃত বিকিরণের কম্পাংক হবে (সমীকরণ 3·14 দ্রষ্টব্য):

$$\nu = \frac{2\pi^2 m e^4}{h^3}\left\{\frac{1}{n^2} - \frac{1}{(n+1)^2}\right\} = \frac{2\pi^2 m e^4}{h^3} \cdot \frac{2n+1}{n^2 (n+1)^2}$$

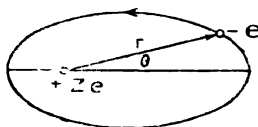
$n$ যদি খুব বড় হয় ($n >> 1$), তাহলে আমরা লিখতে পারি

$$\nu = \frac{2\pi^2 m e^4}{h^3} \cdot \frac{2n}{n^4} = \frac{4\pi^2 m e^4}{n^3 h^3}$$

এক্ষেত্রে নিঃসৃত বিকিরণের কম্পাংক ($\nu$) ইলেকট্রনের আবর্তন কম্পাংকের ($f$) সমান হয়; অর্থাৎ কোয়ানটাম মতবাদ ও পদার্থবিদ্যার সনাতন মতবাদ, দুটি মতবাদ থেকে একই সিদ্ধান্তে উপনীত হওয়া যায়।

উপরের আলোচনায় কোয়ানটাম সংখ্যার পরিবর্তন এক একক ধরা হয়েছে। যদি এই পরিবর্তন দুই, তিন বা ততোধিক এককের সমান হয়, অর্থাৎ যদি $(n+2)$, $(n+3)$ প্রভৃতি ক্রমের কক্ষপথ থেকে $n$ ক্রমের কক্ষপথে সংক্রমণ হয়, তাহলে সহজেই দেখান যায় যে নিঃসৃত বিকিরণের কম্পাংক আবর্তন কম্পাংকের দ্বিগুণ, তিনগুণ প্রভৃতি হবে। সনাতন তড়িৎচুম্বকীয় তত্ত্ব অনুযায়ী এই সব বিকিরণও নিঃসৃত হবার সম্ভাবনা থাকে (3·2 অনুচ্ছেদ দ্রষ্টব্য)।

### 3. 11: উপবৃত্তাকার কক্ষপথ; উইলসন-সমারফেলডের কোয়ানটাম শর্ত

বোরের তত্ত্বে হাইড্রোজেন বা হাইড্রোজেন সদৃশ পরমাণুর মধ্যে ইলেকট্রনের কক্ষপথ বৃত্তাকার বলে কল্পনা করা হয়েছে। আসলে এই কক্ষপথ উপবৃত্তাকারও (Elliptical) হতে পারে। বোর তাঁর তত্ত্ব যখন প্রকাশ করেন তখনই তিনি এই সম্ভাবনার কথা উল্লেখ করেছিলেন। সনাতন বলবিদ্যার সূত্র থেকে জানা যায় যে যদি কোন বস্তুর উপর এমন একটি কেন্দ্রাভিমুখী (Central) আকর্ষণী বল ক্রিয়া করে যা বস্তু এবং বল-কেন্দ্রের (Centre of Force) মধ্যেকার দূরত্বের বর্গের ব্যাস্তানুপাতিক ($F \propto 1/r^2$) হয়, তাহলে বস্তুটি সাধারণতঃ একটি উপবৃত্তাকার কক্ষপথে আবর্তন করে, যার একটি ফোকাসে থাকে বলকেন্দ্রটি। কেবল বিশেষ ক্ষেত্রে কক্ষপথটি বৃত্তাকার হয়। উদাহরণ স্বরূপ কেপলারের সূত্রাবলী (Kepler's Laws) থেকে আমরা জানি যে সূর্যকে ঘিরে আবর্তনশীল গ্রহগুলি সাধারণতঃ উপবৃত্তাকার কক্ষপথে আবর্তন করে। পরমাণুর মধ্যে ইলেকট্রনের উপর কেন্দ্রক হতে দূরত্বের বর্গের ব্যাস্তানুপাতিক কেন্দ্রাভিমুখী আকর্ষণী বল ক্রিয়া করে। কাজেই সাধারণভাবে দেখতে গেলে ইলেকট্রনের কক্ষপথও উপবৃত্তাকার হবে, যার একটি ফোকাসে থাকবে কেন্দ্রকটি (3·10 চিত্র দ্রষ্টব্য)।

চিত্র 3.10
উপবৃত্তাকার কক্ষপথ।

সমতলে আবর্তনশীল কোন কণিকার অবস্থান দুটি মেরুরেখা স্থানাংক (Polar Co-ordinates) $r$ এবং $\theta$ দ্বারা নির্দেশ করা যায়। কক্ষপথ

বৃত্তাকার হলে $r$ অপরিবর্তিত থাকে, শুধু $\theta$ পরিবর্তিত হয়। উপ-বৃত্তাকার কক্ষপথে $r$ এবং $\theta$, উভয়েই পরিবর্তিত হয়। একবার পূর্ণ আবর্তনে $\theta$ পরিবর্তিত হয় O থেকে $2\pi$ পর্যন্ত; কৈন্দ্রিক (Radial) দূরত্ব $r$ উপবৃত্তের এক প্রান্তে ন্যূনতম মান থেকে অন্য প্রান্তে বৃহত্তম মান পর্যন্ত পরিবর্তিত হয়ে আবার প্রাথমিক ন্যূনতম মানে ফিরে আসে। উপবৃত্তাকার কক্ষপথে ইলেকট্রনের এইরূপ পর্যাবৃত্ত (Periodic) গতি কী ধরনের কোয়ানটাম শর্ত মেনে চলবে তা ১৯১৬ সালে জার্মান বিজ্ঞানী সমারফেল্ড (Arnold Sommerfeld) এবং বৃটিশ বিজ্ঞানী উইলসন (W. Wilson) স্বতন্ত্র ভাবে প্রতিপন্ন করেন।

সরল সমঞ্জস গতিতে স্পন্দনশীল একটি রৈখিক স্পন্দকের (Linear Oscillator) কথা বিবেচনা করা যাক। ধরা যাক এর ভর হচ্ছে $m$, এবং একটি স্থির বলকেন্দ্র থেকে যে কোন মুহূর্তে এর সরণ (Displacement) হচ্ছে $x$; তাহলে এর গতির সমীকরণ হবে

$$m\ddot{x}+m\,\omega^2 x = 0$$

এখানে $\omega = 2\pi\nu$ হচ্ছে স্পন্দকটির কৌণিক কম্পাংক। স্পন্দকটির মোট শক্তি এর গতিশক্তি ও স্থিতিশক্তির সমষ্টির সমান:

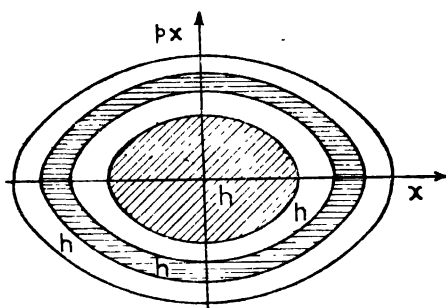
$$E = \tfrac{1}{2} m\,\dot{x}^2+\tfrac{1}{2}\, m\,\omega^2 x^2$$

যদি স্পন্দকের ভরবেগ হয় $p = m\dot{x}$, তাহলে আমরা লিখতে পারি

$$E = \frac{p^2}{2m} + \frac{x^2}{2/m\,\omega^2}$$

সুতরাং
$$\frac{p^2}{2\,m\,E} + \frac{x^2}{2E/m\,\omega^2} = 1 \qquad (3.26)$$

সমীকরণ (3·26) হচ্ছে একটি উপবৃত্তের সমীকরণ। $a = \sqrt{(2mE)}$ এবং $b = \sqrt{(2E/m\omega^2)}$ হচ্ছে উপবৃত্তটির দুটি অর্ধাক্ষ। (3·26) সমীকরণ অনুযায়ী যে কোন মুহূর্তে স্পন্দকটির সরণ $x$ ও তার ভরবেগ $p$ উক্ত সমীকরণ দ্বারা নির্ধারিত উপবৃত্তের উপরকার একটি নির্দিষ্ট বিন্দুর স্থানাংকদ্বয়ের সমান হয় (3·11 চিত্র দ্রষ্টব্য)। স্পন্দকটির একবার পূর্ণ কম্পন যখন সম্পূর্ণ হয় তখন উক্ত বিন্দুটিও উপবৃত্তটিকে একবার সম্পূর্ণ প্রদক্ষিণ করে আসে।

একটা কথা বিশেষ ভাবে মনে রাখতে হবে যে এখানে যে উপবৃত্তের কথা বলা হচ্ছে সেটি পূর্বে উল্লিখিত ইলেকট্রনের উপবৃত্তাকার কক্ষপথ নয়। এক্ষেত্রে উপবৃত্তের উপরে বিন্দুটির স্থান পরিবর্তন কোন প্রকৃত কণিকা বা বস্তুর স্থান পরিবর্তন নির্দেশ করে না। বিভিন্ন সময়ে স্পন্দকের

চিত্র 3.11
সরল সমঞ্জস রৈখিক স্পন্দনের ক্ষেত্রে
$x$ এবং $p_x$ পরিবর্তনের লেখচিত্র।

ভরবেগ এবং অবস্থানের ($p$ এবং $x$) পারস্পরিক সম্পর্ক উপবৃত্তের উপরের বিভিন্ন বিন্দুগুলির অবস্থান দ্বারা নির্ধারিত হয়।

উপবৃত্তটির ক্ষেত্রফল হচ্ছে

$$J = \oint pdx = \pi ab = \pi\sqrt{2mE}\cdot\sqrt{\frac{2E}{m\omega^2}} = \frac{2\pi E}{\omega} = \frac{E}{\nu} \tag{3.27}$$

এখানে $\oint$ চিহ্নটি পূর্ণাবর্ত সমাকলন (Integration over a complete cycle) নির্দেশ করে। পূর্বেই বলা হয়েছে প্ল্যাংক যে কোয়ানটাম মতবাদ প্রচলিত করেন তার সারকথা ছিল যে একটি রৈখিক স্পন্দকের শক্তি $E = nh\nu$ হয়। $n$ হচ্ছে একটি পূর্ণসংখ্যা। প্ল্যাংকের এই কোয়ানটাম শর্ত যদি (3·27) সমীকরণে বসান যায়, তাহলে আমরা পাই

$$J = \oint pdx = nh \tag{3.28}$$

$n = 1, 2, 3$ ইত্যাদি।

অর্থাৎ স্পন্দকটি এমনভাবে স্পন্দিত হবে যে তার গতি নির্ধারক উপবৃত্তটির ক্ষেত্রফল হবে প্ল্যাংক ধ্রুবক $h$ এর পূর্ণ গুণিতক। স্পষ্টতঃ (3·28) সমীকরণ অনুসারে পরপর সম্ভাব্য উপবৃত্তগুলির ক্ষেত্রফল হবে $h$, $2h$, $3h$ ইত্যাদি। সুতরাং দুটি পরপর উপবৃত্তের মধ্যবর্তী স্থানের ক্ষেত্রফল $h$ হবে। সরণ $x$ এবং ভরবেগ $p$, এই দুটিকে স্থানাংক ধরে নিয়ে যে দ্বিমাত্রিক স্থান (Two Dimensional Space) নির্ধারিত করা যায় তাকে বলা হয় 'দশা-স্থান' (Phase Space)।

(3·28) সমীকরণকে মৌলিক কোয়ানটাম শর্ত বলে ধরা যেতে পারে। এর থেকে প্ল্যাংকের শক্তি সম্বন্ধীয় কোয়ানটাম শর্ত ($E = nh\nu$) এবং বোরের কৌণিক ভরবেগ সম্পর্কিত কোয়ানটাম শর্ত ($p = nh/2\pi$), দুটি শর্তই পাওয়া যায়।

রৈখিক স্পন্দন থেকে এখন আমরা (3.28) কোয়ানটাম শর্ত চক্রায়িত পর্যাবৃত্ত গতির (Cyclically Periodic Motion) ক্ষেত্রে প্রয়োগ করব। বোরের তত্ত্বে ইলেকট্রনের গতিপথ বৃত্তাকার ধরা হয়; সুতরাং কেবল কৌণিক স্থানাংক $\theta$ পরিবর্তিত হয়। এখানে $x$ এর পরিবর্তে কৌণিক স্থানাংক $\theta$ ইলেকট্রনের অবস্থান নির্দেশ করে। কাজেই ইলেকট্রনটির গতি নির্দেশ করতে রৈখিক ভরবেগ $p$ এর পরিবর্তে কৌণিক ভরবেগ $p_\theta$ বিবেচনা করতে হবে। এক্ষেত্রে কোয়ানটাম শর্ত লেখা যেতে পারে

$$J = \oint p_\theta \, d\theta = nh, \quad n = 1, 2, 3, \ldots\ldots \text{ ইত্যাদি}$$

যেহেতু সনাতন বলবিদ্যা অনুযায়ী যদি কোন কণিকার উপর একটি কেন্দ্রাভিমুখী বল ক্রিয়া করে, তাহলে তার কৌণিক ভরবেগ ধ্রুবক হয়, অতএব $p_\theta =$ ধ্রুবক। সুতরাং আমরা পাই

$$J = \oint p_\theta \, d\theta = p_\theta \oint d\theta = 2\pi p_\theta = nh$$

অতএব $p_\theta = nh/2\pi$

উপরোক্ত সমীকরণই হচ্ছে বোরের কোয়ানটাম শর্ত (সমীকরণ 3·2)।

এইবার উপবৃত্তাকার কক্ষপথের জন্য কোয়ানটাম শর্ত কী হবে দেখা যাক। এক্ষেত্রে ইলেকট্রনের গতিশক্তি হবে

$$E_k = p_r^2/2m - p_\theta^2/2m\, r^2$$

এখানে $p_r = m\dot{r}$ হচ্ছে ইলেকট্রনের কৈন্দ্রিক (Radial) ভরবেগ, আর $p_\theta = mr^2\dot{\theta}$ হচ্ছে তার কক্ষপথের কৌণিক ভরবেগ। কাজেই এক্ষেত্রে ইলেকট্রনের অবস্থান এবং গতি নির্দেশ করবার জন্য $(r, p_r)$ এবং $(\theta, p_\theta)$, এই দুই জোড়া স্থানাংকের প্রয়োজন। উইলসন-সমারফেলডের কোয়ানটাম শর্ত হচ্ছে যে যদি কোন বস্তুকণিকার স্থানাংকগুলি পর্যাবৃত্তভাবে (Periodically) সময়ের সংগে পরিবর্তিত হয়, তাহলে প্রতিটি স্থানাংকের একটি করে কোয়ানটাম শর্ত থাকবে। এই শর্ত হল

$$\oint p_q \, dq = n_q h$$

এখানে $q$ একটি স্থানাংক নির্দেশ করে (যথা $r$, $\theta$ ইত্যাদি) আর $p_q$ নির্দেশ করে $q$ স্থানাংকের সংগে সম্পর্কিত ভরবেগ (যথা $p_r$, $p_\theta$ ইত্যাদি);

$n_q$ হচ্ছে একটি পূর্ণ সংখ্যা। স্পষ্টতঃ বর্তমান ক্ষেত্রে দুটি কোয়ানটাম শর্ত থাকবে। সেগুলি হচ্ছে

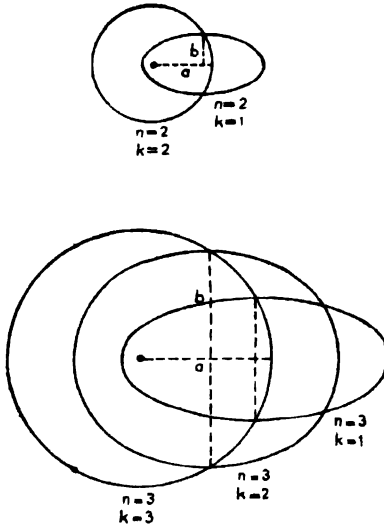
$$\oint p_r\, dr = n_r h \tag{3.29}$$

$$\oint p_\theta\, d\theta = kh \tag{3.30}$$

এখানে $n_r$ এবং $k$ উভয়েই হচ্ছে পূর্ণ সংখ্যা। এদের বলা হয় যথাক্রমে কৈন্দ্রিক (Radial) কোয়ানটাম সংখ্যা এবং কক্ষীয় (Orbital) কোয়ানটাম সংখ্যা। অর্থাৎ বোরের তত্ত্বের একটি মাত্র কোয়ানটাম সংখ্যা $n$ এর পরিবর্তে উপবৃত্তাকার কক্ষপথের ক্ষেত্রে দুটি কোয়ানটাম সংখ্যার প্রয়োজন হয়।

## 3. 12 : উপবৃত্তাকার কক্ষপথের তত্ত্ব

সনাতন বলবিদ্যা অনুযায়ী যখন কোন বস্তুর উপর কেন্দ্রাভিমুখী বল ক্রিয়া করে তখন তার কৌণিক ভরবেগ ধ্রুবক হয়। কাজেই (3·30) সমীকরণে $p_\theta$ সংখ্যাটিকে ধ্রুবক বলে ধরা যেতে পারে। অতএব

$$2\pi p_\theta = kh, \text{ অথবা } p_\theta = kh/2\pi,\ k = 1, 2, 3, \text{ ইত্যাদি}$$

চিত্র 3.12
নির্দিষ্ট প্রধান কোয়ানটাম সংখ্যার জন্য সম্ভাব্য উপবৃত্তাকার কক্ষপথ সমূহের চিত্ররূপ।

স্পষ্টতঃ $k = 0$ হতে পারে না, কারণ তাহলে ইলেকট্রনের কৌণিক বেগ $\dot{\theta} = 0$ হবে; অর্থাৎ ইলেকট্রন তখন কেন্দ্রকের মধ্য দিয়ে গতিশীল একটি রৈখিক স্পন্দকে পরিণত হবে।

উপবৃত্তাকার কক্ষপথে আবর্তনশীল ইলেকট্রনের ক্ষেত্রে প্রমাণ করা যেতে পারে যে উপবৃত্তটির উৎকেন্দ্রতা (Eccentricity) যদি $\varepsilon$ হয়, তাহলে

$$\sqrt{1-\varepsilon^2} = b/a$$

এখানে $a$ এবং $b$ যথাক্রমে উপবৃত্তের অর্ধ-পরাক্ষ ও অর্ধ-উপাক্ষ (Semi Major Axis and Semi Minor Axis)। আবার (3·30) সমীকরণ থেকে পাওয়া যায় (A.1 পরিশিষ্ট দ্রষ্টব্য)ঃ

$$\sqrt{1-\varepsilon^2} = \frac{k}{n_r+k} = \frac{k}{n}$$

এখানে $n_r$ ও $k$ সংখ্যাদুটির যোগফলকে $n$ লেখা হয়েছে। $n$ সংখ্যাটিকে বলা হয় প্রধান কোয়ানটাম সংখ্যা (Principal Quantum Number)। স্পষ্টতঃ $n$ একটি পূর্ণ সংখ্যা হবে, কারণ $n_r$ ও $k$ উভয়েই পূর্ণ সংখ্যা। উপরের দুটি সমীকরণ থেকে আমরা পাই

$$\frac{b}{a} = \frac{k}{n}$$

যখন কক্ষপথটি বৃত্তাকার হয়, তখন $\varepsilon = 0$ হয় এবং $b = a$ হয়; তখন $k$ বৃহত্তম হয়; অর্থাৎ $k = n$ হয়। যেহেতু $k$ এর ন্যূনতম মান হচ্ছে 1, অতএব $n$ এর ন্যূনতম সম্ভাব্য মানও হচ্ছে 1, অর্থাৎ $n$ এর বিভিন্ন সম্ভাব্য মানগুলি হবে $n = 1, 2, 3,$ ইত্যাদি। আবার যেহেতু $n = n_r + k$, অতএব $n_r$ সংখ্যাটির ন্যূনতম মান হবে শূন্য; অর্থাৎ এর সম্ভাব্য মানগুলি হবে $n_r = 0, 1, 2, 3, \ldots (n-1)$। স্পষ্টতঃ $k$ সংখ্যাটির সংশ্লিষ্ট (Corresponding) মানগুলি $k = n, (n-1), (n-2), \ldots . 1$ হবে। নির্দিষ্ট $n$ এর জন্য $k$ এর উপরোক্ত সম্ভাব্য মানগুলি বসালে উপবৃত্তগুলির উপাক্ষ ও পরাক্ষের নিম্নলিখিত বিভিন্ন সম্ভাব্য অনুপাত পাওয়া যায়ঃ

$$\frac{b}{a} = \frac{1}{n}, \frac{2}{n}, \frac{3}{n}, \ldots 1$$

(3·12) চিত্রে নির্দিষ্ট $n$ এর ক্ষেত্রে বিভিন্ন সম্ভাব্য উপবৃত্তগুলি দেখান হয়েছে; স্পষ্টতঃ মোট $n$ সংখ্যক উপবৃত্ত থাকবে। $k$ যত ক্ষুদ্র

হবে, উপবৃত্তের উৎকেন্দ্রতা তত বেশী হবে। $k=1$ হলে সবচেয়ে বেশী চ্যাপটা উপবৃত্ত পাওয়া যাবে।

উপবৃত্তাকার কক্ষপথে ইলেকট্রনটির মোট শক্তি হবে

$$E = E_k + V = \frac{p_r^2}{2m} + \frac{p_\theta^2}{2mr^2} - \frac{Ze^2}{r}$$

(A. 1) পরিশিষ্টে প্রমাণ করা হবে যে এই শক্তির মান হচ্ছে

$$E = -\frac{2\pi^2 m Z^2 e^4}{n^2 h^2}$$

অর্থাৎ ইলেকট্রনের মোট শক্তি কক্ষীয় কোয়ানটাম সংখ্যা $k$ এর উপর নির্ভরশীল নয়, কেবল পূর্ণ কোয়ানটাম সংখ্যা $n$ এর উপর নির্ভরশীল। আবার উপবৃত্তগুলির অর্ধ-পরাক্ষের মান পাওয়া যায় (A. 1 পরিশিষ্ট দ্রষ্টব্য)

$$a = \frac{n^2 h^2}{4\pi^2 m Z e^2}$$

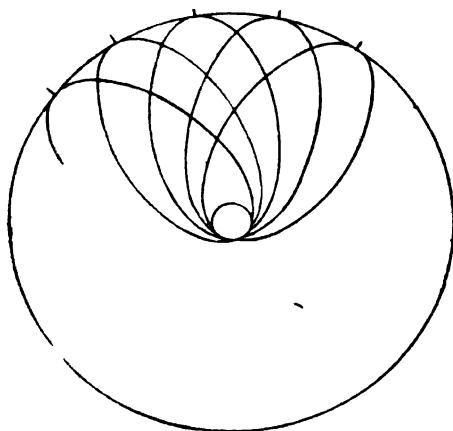
অর্থাৎ অর্ধ-পরাক্ষের মানও পূর্ণ কোয়ানটাম সংখ্যা $n$ এর উপর নির্ভরশীল, কক্ষীয় কোয়ানটাম সংখ্যা $k$ এর উপর নয়। উপরে প্রদত্ত অর্ধ-পরাক্ষের মান বোর তত্ত্ব থেকে প্রাপ্ত বৃত্তাকার কক্ষপথের ব্যাসার্ধের সমান হয় (সমীকরণ 3·4 দ্রষ্টব্য)। কাজেই নির্দিষ্ট $n$ এর ক্ষেত্রে যে $n$ সংখ্যক উপবৃত্ত পাওয়া যায় তাদের প্রত্যেকটির পরাক্ষ সমান হবে এবং তাদের প্রত্যেকটির ক্ষেত্রে ইলেকট্রনের শক্তিও সমান হবে।

উপরের আলোচনা থেকে দেখা যায় যে সমারফেলড তত্ত্বানুযায়ী প্রাপ্ত ইলেকট্রনের শক্তিস্তরগুলি বোরের তত্ত্ব থেকে প্রাপ্ত স্তরগুলি থেকে অভিন্ন হবে। কাজেই নিঃসৃত বর্ণালীও দুই ক্ষেত্রে একই রকম হবে। কিন্তু বাস্তব ক্ষেত্রে দেখা যায় হাইড্রোজেন সদৃশ পরমাণুগুলির বর্ণালী বোর বা উইলসন-সমারফেল্ড তত্ত্বানুযায়ী যে রকম বর্ণালী পাওয়া উচিত তার সংগে সঠিক মেলেনা। এই সব তত্ত্বের ভিত্তিতে যতগুলি বর্ণালী রেখা পাওয়া উচিত প্রকৃতপক্ষে তার থেকে বেশী সংখ্যক রেখা দেখতে পাওয়া যায়। খুব উচ্চ বিশ্লেষণ ক্ষমতা সম্পন্ন বর্ণালীমাপক যন্ত্রের সাহায্যে বিশ্লেষণ করলে দেখা যায় যে হাইড্রোজেনের বামার শ্রেণীর প্রতিটি বর্ণালী রেখা একক নয়, কয়েকটি খুব কাছাকাছি অবস্থিত বর্ণালী রেখার সমন্বয়ে গঠিত। একে বলা হয় বর্ণালী রেখার 'সূক্ষ্ম গঠন' (Fine Structure)।

হাইড্রোজেন সদৃশ পরমাণুর বর্ণালী রেখার এই সূক্ষ্ম গঠনের উৎপত্তির সম্ভাব্য কারণ প্রথম নির্দেশ করেন সমারফেল্ড। তিনি দেখান যে উপ-বৃত্তাকার কক্ষপথে ভ্রাম্যমান ইলেকট্রনটি যখন কেন্দ্রকের খুব কাছে আসে তখন তার বেগ এত বেশী হয় যে আইনষ্টাইনের আপেক্ষিক তত্ত্ব অনুযায়ী তার ভর কিছুটা বেড়ে যায়। উক্ত তত্ত্ব অনুযায়ী $v$ বেগে ভ্রমণশীল কণিকার ভর $m$ ও তার স্থির ভরের $(m_0)$ মধ্যেকার সম্পর্ক হচ্ছে (সমীকরণ 8·25 দ্রষ্টব্য)ঃ

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$$

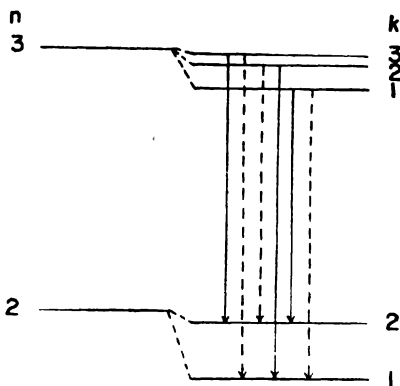
এখানে $c$ হচ্ছে আলোকের বেগ। ভরের এইরূপ বৃদ্ধির ফলে ইলেকট্রনটি প্রত্যেকবার আবর্তনকালে যখন কেন্দ্রকের কাছ দিয়ে যায়, তখন তার উপবৃত্তাকার কক্ষপথটি পূর্বের অবস্থান থেকে অল্প সরে যায়। কক্ষপথের এই সরণ (3·13) চিত্রে দেখান হয়েছে। এইরূপ সরণকে বলা হয় কক্ষপথের 'অয়নচলন' (Precession of the Orbit)। এই প্রকার কক্ষ-

চিত্র 3.13
উপবৃত্তাকার কক্ষপথের অয়নচলন।

পথের অয়নচলন সৌরমণ্ডলে সূর্যের নিকটতম বুধ গ্রহের ক্ষেত্রে দেখা যায়। এইরূপ অয়নচলনের ফলে উপবৃত্তাকার কক্ষপথের পরাক্ষ নির্দিষ্ট কৌণিক বেগ (অয়নচলন বেগ) সহকারে আবর্তিত হতে থাকে। এই

কৌণিক বেগ নির্ভর করে ইলেকট্রনটি কেন্দ্রকের কত কাছাকাছি আসতে পারে তার উপর। উপবৃত্ত বেশী চ্যাপটা হলে, অর্থাৎ $k$ কম হলে, ইলেকট্রনটি তার কক্ষপথে কেন্দ্রকের যত কাছাকাছি আসতে পারে, কম চ্যাপটা উপবৃত্তের ক্ষেত্রে তা হয় না। কাজেই বেশী চ্যাপটা উপবৃত্তের ক্ষেত্রে ইলেকট্রনের অয়নচলন বেগ অপেক্ষাকৃত বেশী হয়। কক্ষপথের এই অয়নচলন গতির জন্য সমমান সম্পন্ন $n$ এর জন্য বিভিন্ন উপবৃত্ত-গুলিতে আবর্তনশীল ইলেকট্রনের মোট শক্তির পরিমাণ ভিন্ন হয়। স্পষ্টতঃ এই সিদ্ধান্ত বোরের বা উইলসন-সমারফেল্ডের তত্ত্বলব্ধ সিদ্ধান্ত থেকে ভিন্ন। সমারফেল্ড প্রমাণ করেন যে এক্ষেত্রে নির্দিষ্ট $n$ এবং $k$ সম্পন্ন উপবৃত্তে আবর্তনশীল ইলেকট্রনের মোট শক্তি হয়

$$E_{n,k} = -\frac{2\pi^2\mu Z^2e^4}{n^2h^2}\left\{1 + \frac{Z^2\alpha^2}{n^2}\left(\frac{n}{k} - \frac{3}{4}\right)\right\} \quad (3.31)$$

এখানে
$$\alpha = \frac{2\pi e^2}{ch} \quad (3.32)$$

$\alpha$ সংখ্যাটিকে বলা হয় সমারফেল্ডের 'সূক্ষ্ম-গঠন ধ্রুবক' (Fine Structure Constant)। (3·32) সমীকরণে বিভিন্ন সংখ্যার মান বসালে পাওয়া যায় $\alpha = 1/137$ (প্রায়)। যেহেতু $\alpha << 1$ সুতরাং (3·31) সমীকরণের প্রধান বন্ধনীর মধ্যে দ্বিতীয় পদটির মান খুবই কম। এই পদটি উপেক্ষা করলে শক্তির যে মান পাওয়া যায় তা বোর তত্ত্ব থেকে প্রাপ্ত মান থেকে অভিন্ন। ইলেকট্রনের ভর পরিবর্তন জনিত শুদ্ধি-পদটি কক্ষীয় কোয়ানটাম সংখ্যা $k$ এর উপর নির্ভর করে। সুতরাং নির্দিষ্ট পূর্ণ কোয়ানটাম সংখ্যা $(n)$ সম্পন্ন বিভিন্ন উপবৃত্তে আবর্তনশীল ইলেকট্রনের শক্তি পরস্পরের থেকে অল্প পরিমাণে পৃথক হয়। অর্থাৎ বোর তত্ত্ব থেকে প্রাপ্ত নির্দিষ্ট $n$ সম্পন্ন শক্তিস্তরগুলি একক না হয়ে $n$ সংখ্যক খুব কাছাকাছি অবস্থিত স্তরে বিভাজিত হয়ে যায়। এদের প্রত্যেকটির জন্য $k$ ভিন্ন হয়ঃ যথা $k = 1, 2, 3, \ldots n$। এই শক্তিস্তর-গুলি (3·14) চিত্রে দেখান হয়েছে। চিত্র থেকে দেখা যায় যে বৃহত্তর $k$ সম্পন্ন শক্তিস্তরগুলি ক্ষুদ্রতর $k$ সম্পন্ন স্তর অপেক্ষা উপরে থাকে। এখানে উল্লেখযোগ্য যে (3·14) চিত্রে একই $n$ এবং বিভিন্ন $k$ সম্পন্ন শক্তি-স্তরগুলির পারস্পরিক দূরত্ব সমীকরণ (3·31) থেকে প্রাপ্ত এদের মধ্যেকার প্রকৃত দূরত্বের তুলনায় অনেক বেশী করে দেখান হয়েছে। এক্ষেত্রে বিভিন্ন শক্তিস্তরের মধ্যে সংক্রমণের ফলে বোর তত্ত্ব থেকে প্রাপ্ত বর্ণালী রেখার

চিত্র 3.14
আপেক্ষিকতাবাদ অনুযায়ী ইলেকট্রনের ভর পরিবর্তনের প্রভাবে হাইড্রোজেন শক্তিস্তর সমূহের বিভাজন। চিত্রে বিভাজনের পরিমাণ বহুগুণে বর্ধিত মাত্রায় দেখান হয়েছে।

সংখ্যার তুলনায় অনেক বেশী সংখ্যক রেখা উৎপন্ন হয়। এই সংক্রমণগুলি (3·14) চিত্রে নিম্নমুখী তীরচিহ্ন দ্বারা নির্দেশ করা হয়েছে। উদাহরণস্বরূপ বামার শ্রেণীর $H_\alpha$ রেখার কথা বিবেচনা করা যেতে পারে। বোর তত্ত্ব অনুসারে এই রেখার উৎপত্তি হয় $n=3$ থেকে $n=2$ শক্তিস্তরে সংক্রমণের ফলে। নূতন তত্ত্বে $n=3$ শক্তিস্তরটি তিনটি উপশক্তিস্তরে বিভাজিত হয়ে যায়, যাদের কক্ষীয় কোয়ানটাম সংখ্যা $k=1, 2$ এবং $3$ হয়। আবার $n=2$ শক্তিস্তরটি দুটি উপশক্তিস্তরে বিভাজিত হয়, যাদের কক্ষীয় কোয়ানটাম সংখ্যা $k=1$ এবং $2$ হয়। এই বিভিন্ন উপশক্তিস্তরগুলির মধ্যে সংক্রমণের ফলে ছয়টি বিভিন্ন কম্পাংক সম্পন্ন বর্ণালী রেখার উৎপত্তি হওয়া উচিত, অর্থাৎ $H_\alpha$ রেখা ছয়টি রেখায় বিভাজিত হওয়া উচিত। এই সম্ভাব্য রেখাগুলি ছয়টি নিম্নমুখী তীরচিহ্ন দ্বারা নির্দেশ করা হয়েছে। পরীক্ষার দ্বারা কিন্তু দেখা যায় যে $H_\alpha$ রেখাটি অপেক্ষাকৃত কম সংখ্যক রেখায় বিভাজিত হয়। এর কারণ স্বরূপ বলা হয় যে কেবল সেইসব সংক্রমণ ঘটতে পারে যাদের ক্ষেত্রে কক্ষীয় কোয়ানটাম সংখ্যা $k$ পরিবর্তনের মান $\pm 1$ হয়; অর্থাৎ যদি $k_i$ এবং $k_f$ কক্ষীয় কোয়ানটাম সংখ্যার প্রাথমিক এবং চরম মান হয়, তাহলে লেখা যেতে পারে

$$\Delta k = k_i - k_f = \pm 1 \qquad (3.33)$$

(3·14) চিত্র থেকে দেখা যায় যে $H_\alpha$ রেখার ক্ষেত্রে সমীকরণ (3·33) অনুযায়ী নিম্নলিখিত সংক্রমণগুলি সম্ভব হতে পারে; $k_i = 1$ থেকে $k_f = 2$ ($\Delta k = -1$); $k_i = 2$ থেকে $k_f = 1$ ($\Delta k = +1$); $k_i = 3$ থেকে $k_f = 2$ ($\Delta k = +1$)। অপর তিনটি সংক্রমণ ঘটতে পারে না। কারণ এই সংক্রমণগুলি (3·33) সমীকরণের পরিপন্থী। (3·33) সমীকরণকে বলা হয় সংক্রমণের 'নির্বাচন-সূত্র' (Selection Rule for Transition)। (3·14) চিত্রে উপরোক্ত নির্বাচন সূত্র অনুযায়ী সম্ভাব্য সংক্রমণ তিনটিকে অবিচ্ছিন্ন রেখা দ্বারা এবং অপর তিনটিকে বিচ্ছিন্ন রেখা দ্বারা নির্দেশ করা হয়েছে।

প্রকৃতপক্ষে দেখা যায় যে হাইড্রোজেন বর্ণালীর সূক্ষ্ম গঠন উপরে আলোচিত তত্ত্বের ভিত্তিতে প্রাপ্ত সূক্ষ্ম গঠনের সংগে ঠিক মেলে না। তাছাড়া (3·31) সমীকরণের সাহায্যে প্রতিপন্ন সম্ভাব্য বর্ণালী রেখা সমূহের তরঙ্গসংখ্যার পার্থক্য পরীক্ষাগারে পরিমিত পার্থক্যের সংগেও ভাল ভাবে মেলে না। এই গরমিলের কারণ হচ্ছে ইলেকট্রনের ঘূর্ণন (Spin)। এ সম্বন্ধে (5·2) অনুচ্ছেদে আলোচনা করা হবে।

কক্ষীয় কোয়ানটাম সংখ্যার ক্ষেত্রে প্রযোজ্য নির্বাচন সূত্রের (সমীকরণ 3·33) অনুরূপ নির্বাচন সূত্র আরও অন্যান্য কোয়ানটাম সংখ্যার ক্ষেত্রেও আবিষ্কৃত হয়েছে। সেগুলি যথাস্থানে আলোচিত হবে। এখানে উল্লেখযোগ্য যে এইসব নির্বাচন সূত্রগুলিকে কোন কোন ক্ষেত্রে বোরের 'সাদৃশ্য তত্ত্বের' সাহায্যে ব্যাখ্যা করা সম্ভব হয়।

## 3. 13 : পুরাতন কোয়ানটাম তত্ত্বের ত্রুটি

বোর এবং সমারফেল্‌ড কর্তৃক উদ্‌ভাবিত কোয়ানটাম তত্ত্বকে বর্তমানে পুরাতন কোয়ানটাম তত্ত্ব (Old Quantum Theory) আখ্যায় অভিহিত করা হয়। এই তত্ত্বকে প্রসারিত করে কিছু কিছু জটিলতর পরমাণুর বর্ণালী সীমিত ভাবে ব্যাখ্যা করা সম্ভব হয়েছে, যথা লিথিয়াম, সোডিয়াম প্রভৃতি ক্ষারীয় পরমাণুর ক্ষেত্রে। এদের কক্ষপথে একাধিক ইলেকট্রন আবর্তন করলেও এদের বহির্গঠনের সংগে একটি মাত্র ইলেকট্রন সম্বলিত হাইড্রোজেন বা হাইড্রোজেন সদৃশ পরমাণুর গঠনের অনেকটা সাদৃশ্য আছে। কিন্তু যে সব ক্ষেত্রে এইরূপ সাদৃশ্য নাই, পুরাতন কোয়ানটাম তত্ত্ব সেই সব পরমাণুর বর্ণালী ব্যাখ্যা করতে সম্পূর্ণ অক্ষম। এমন কী

মাত্র দুটি ইলেকট্রন সম্বলিত হিলিয়াম পরমাণুর বর্ণালীরও সম্যক ব্যাখ্যা উক্ত তত্ত্ব দ্বারা সম্ভব নয়।

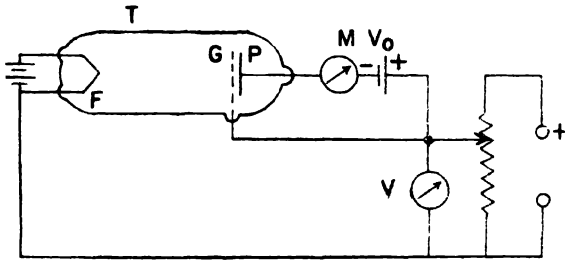
আবার যদিও হাইড্রোজেন বা হাইড্রোজেন সদৃশ পরমাণুর বর্ণালী রেখাগুলির তরঙ্গ-সংখ্যা সনাতন কোয়ানটাম তত্ত্ব থেকে গণনার দ্বারা নির্ণয় করা সম্ভব, বর্ণালী রেখাগুলির তীব্রতা কিন্তু উক্ত তত্ত্বের সাহায্যে ব্যাখ্যা করা সম্ভব নয়।

এইসব কারণে পরবর্তী যুগে উপরোক্ত ত্রুটিগুলি থেকে মুক্ত নূতন একটি তত্ত্ব উদ্ভাবিত করার জন্য বৈজ্ঞানিক মহলে সবিশেষ প্রচেষ্টা হয়। অবশেষে বর্তমান শতাব্দীর তৃতীয় দশকে এই প্রচেষ্টা সফল হয়। ফরাসী বিজ্ঞানী দ্য ব্রয় (Louis de Broglie) এ বিষয়ে প্রথম পথ প্রদর্শন করেন ১৯২৪ সালে, তার তরঙ্গ বলবিদ্যা (Wave Machanics) আবিষ্কার করে। পর বৎসর জার্মান বিজ্ঞানী শ্রোডিংগার (Erwin Schrödinger) কোয়ানটাম বলবিদ্যা (Quantum Mechanics) তত্ত্ব উদ্ভাবিত করেন। পরবর্তী যুগে হাইসেনবার্গ (Heisenberg), ডিরাক (Dirac) প্রমুখ বিজ্ঞানীদের হাতে এই তত্ত্ব আরও সম্প্রসারিত হয়। বর্তমানে পরমাণবিক গঠন ব্যাখ্যা করার জন্য এই তত্ত্ব সার্বিকভাবে স্বীকৃত। সপ্তম পরিচ্ছেদে এই তত্ত্বের মূল ভিত্তিগুলি সংক্ষেপে আলোচনা করা হবে। এখানে শুধু উল্লেখ করা যেতে পারে যে এই নূতন তত্ত্বে পরমাণুর কোন প্রতিরূপ (Model) কল্পনা করা হয় না। ইলেকট্রন প্রভৃতি ক্ষুদ্র কণিকাগুলির প্রত্যেকের একটা তরঙ্গরূপ আছে বলে মনে করা হয়। এই তরঙ্গরূপ ব্যতিচার (Interference) ব্যবর্তন (Diffraction) প্রভৃতি পরীক্ষা দ্বারা প্রমাণিত হয়েছে (সপ্তম পরিচ্ছেদ দ্রষ্টব্য)। অর্থাৎ এই সব পরমাণবিক কণিকার তরঙ্গ এবং কণিকা এই দ্বৈত (Dual) স্বরূপ আছে। আলোকের ক্ষেত্রেও এই দ্বৈত স্বরূপ পরীক্ষা দ্বারা প্রমাণিত হয়েছে। ব্যতিচার, ব্যবর্তন প্রভৃতি পরীক্ষায় আলোকের তরঙ্গরূপ প্রতীয়মান হয়; আবার আলোক-তাড়িত (Photo Electric) ক্রিয়া, কম্পটন ক্রিয়া, প্রভৃতি থেকে আলোকের কণিকারূপ প্রতীয়মান হয় (চতুর্থ ও ষষ্ঠ পরিচ্ছেদ দ্রষ্টব্য)। পুরাতন কোয়ানটাম তত্ত্বের মত কক্ষপথে বিচরণশীল ইলেকট্রনের গতি বিবেচনা না করে কোয়ানটাম বলবিদ্যায় ইলেকট্রনের সংশ্লিষ্ট তরঙ্গের তরঙ্গ-সমীকরণ সমাধান করে নিঃসৃত বর্ণালীর ব্যাখ্যা করা হয়। এই পদ্ধতি অনেক বেশী ফলপ্রসূ।

### 3. 14 : অনুনাদ বিভব: ফ্র্যাংক ও হার্ৎসের পরীক্ষা

বোরের তত্ত্বে পরমাণুর মধ্যে যে অবচ্ছিন্ন (Discrete) শক্তিস্তরের

কল্পনা করা হয় বর্ণালী-বিষয়ক (Spectroscopic) পরীক্ষা থেকে সেগুলির অস্তিত্বের পরোক্ষ প্রমাণ পাওয়া যায়। বোরের তত্ত্ব প্রকাশের অল্প কিছুকাল পরেই ফ্র্যাংক ও হার্ৎস (Frank and Hertz) নামক দুই বিজ্ঞানী ১৯১৪ সালে অন্য ধরণের পরীক্ষার সাহায্যে এই রূপ শক্তিস্তরের অস্তিত্বের প্রত্যক্ষ প্রমাণ দেখাতে সক্ষম হন।

তাঁদের পরীক্ষা পদ্ধতি (3·15) চিত্রে প্রদর্শিত হয়েছে। T একটি আবদ্ধ নল, যার মধ্যে F একটি ধাতব তন্তু থাকে। বাইরে থেকে তড়িৎ প্রবাহ সরবরাহ করে এই তন্তুটিকে উত্তপ্ত করার ব্যবস্থা করা যায়, যার ফলে এর থেকে তাপীয় ইলেকট্রন নিঃসৃত হতে পারে (4·8 অনুচ্ছেদ

চিত্র 3.15

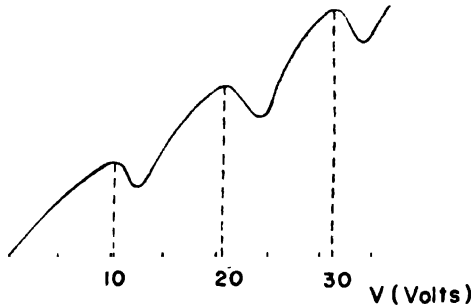
ফ্র্যাংক ও হার্ৎসের পরীক্ষা ব্যবস্থা।

দ্রষ্টব্য)। F থেকে কিছুদূরে অবস্থিত P একটি ধাতব সংগ্রাহক প্লেট। তাপীয় ইলেকট্রনগুলিকে P সংগ্রাহকে পেঁছিতে হলে P এর অল্পদূরে অবস্থিত G ধাতব গ্রিড (Grid) পার হয়ে যেতে হয়। T নলের মধ্যে কোন গ্যাসীয় মৌল বা কোন মৌলের বাষ্প (যেমন পারদ বাষ্প) নিম্ন-চাপে রাখা হয়। G গ্রিডকে F তন্তুর সাপেক্ষে ধনাত্মক বিভবে রাখা হয়, যাতে নিঃসৃত তাপীয় ইলেকট্রনগুলি গ্রিডের দিকে যাবার সময় ক্রমবর্ধমান গতিশক্তি অর্জন করে। অবশেষে গ্রিডে উপস্থিত হবার সময় ইলেকট্রনের অর্জিত শক্তি উচ্চতম হয়। স্পষ্টতঃ G গ্রিডটি অ্যানোডের কাজ করে। এর সাপেক্ষে P সংগ্রাহকটি অল্প ঋণাত্মক বিভবে রাখা হয়। এই ঋণাত্মক প্রতিবন্ধ বিভব (Retarding Potential) $V_0$ প্রায় আধ ভোল্টের মত হয়। G পার হবার সময় ইলেকট্রনগুলির গতিশক্তি যদি $eV_0$ অপেক্ষা কম হয়, তাহলে তারা P পর্যন্ত পেঁছিতে পারে না।

এখন F থেকে নিঃসৃত একটি ইলেকট্রন এবং T নলের মধ্যে বর্তমান মৌলের পরমাণুর মধ্যে যদি সংঘাত ঘটে, তাহলে পরমাণুটি ইলেকট্রনের কাছ থেকে কিছুটা শক্তি পেতে পারে। সংঘাত যদি স্থিতিস্থাপক হয়, তাহলে পরমাণু কর্তৃক অর্জিত শক্তির পরিমাণ খুবই অল্প হয়, কারণ পরমাণুগুলি ইলেকট্রনের তুলনায় অনেক বেশী ভারী হয়। অপরপক্ষে আপতিত ইলেকট্রনটি যদি পরমাণুর অভ্যন্তরস্থ একটি ইলেকট্রনের সংগে সংঘাত প্রাপ্ত হয়, তাহলে শেষোক্ত ইলেকট্রনটি বহিরাগত ইলেকট্রনের কাছ থেকে অনেকখানি শক্তি অর্জন করতে পারে। এমন কী, মুখোমুখি সংঘাত (Head on Collision) হলে আঘাতকারী ইলেকট্রনের সমগ্র শক্তি দ্বিতীয় ইলেকট্রনটিতে হস্তান্তরিত হতে পারে। বোরের তত্ত্ব থেকে আমরা জানি যে পরমাণুর মধ্যে ইলেকট্রন কতকগুলি সুনির্দিষ্ট শক্তিস্তরে অবস্থান করে। আঘাতকারী ইলেকট্রনের শক্তির পরিমাণ যদি পরমাণুর মধ্যে আবদ্ধ ইলেকট্রনটিকে এইরূপ এক শক্তিস্তর থেকে অন্য স্তরে সংক্রমিত করবার পক্ষে যথেষ্ট না হয়, তাহলে দুটি ইলেকট্রনের মধ্যে সংঘাত হওয়া সত্বেও কোন শক্তি বিনিময় হয় না। ফলে তাপীয় ইলেকট্রন-গুলি তাদের সমগ্র অর্জিত শক্তি নিয়ে G অ্যানোড পার হয়ে P সংগ্রাহকের উপরে আপতিত হয়, এবং M মাপক যন্ত্রে (Meter) কিছুটা তড়িৎ প্রবাহ নির্দেশিত হয়। F এবং G এর মধ্যের বিভব প্রভেদ ক্রমশঃ বাড়াতে থাকলে তাপীয় ইলেকট্রনগুলির অর্জিত শক্তি বৃদ্ধি পেতে থাকে এবং উপরোক্ত তড়িৎ প্রবাহও বৃদ্ধি পায়। অবশেষে তাপীয় ইলেকট্রনগুলির অর্জিত উচ্চতম শক্তির মান যখন পরমাণুর দুটি শক্তিস্তরের শক্তি ব্যবধানের সংগে সমান হয়, তখন এই আপতিত ইলেকট্রনগুলির সংগে সংঘাতের ফলে পরমাণু মধ্যস্থ ইলেকট্রনগুলি এক শক্তিস্তর থেকে অন্য স্তরে সংক্রমিত হতে পারে। যখন এইরূপ ঘটে তখন বহিরাগত ইলেকট্রনের সমগ্র শক্তি পরমাণু মধ্যস্থ ইলেকট্রনে হস্তান্তরিত হয়। এইরূপ সংঘাত ঘটে ঠিক G অ্যানোডের পিছনে। এই সংঘাতকে অস্থিতিস্থাপক সংঘাত (Inelastic Collision) বলা যায়। যেহেতু বহিরাগত ইলেকট্রন এইরূপ সংঘাতের ফলে সম্পূর্ণ শক্তিহীন হয়ে যায়, প্রতিবন্ধ বিভবের (Retarding Potential) প্রভাবে তারা আর G থেকে P পর্য্যন্ত পেঁৗছতে সমর্থ হয় না। ফলে M মাপক যন্ত্রে নির্দেশিত তড়িৎ প্রবাহ সহসা খুব হ্রাস পেয়ে যায়। এই অবস্থায় F এবং G এর মধ্যেকার বিভব প্রভেদকে বলা হয়, 'অনুনাদ বিভব' (Resonance Potential), কারণ উপরে আলোচিত সংঘটনের সংগে শব্দতত্ত্বের অনুনাদের যথেষ্ট সাদৃশ্য আছে। শব্দতত্ত্বে

আলোচিত অনুনাদের ক্ষেত্রেও একটি কম্পনশীল বস্তু একটি নিকটস্থ কম্পনকারক বস্তুর অনেকটা শক্তি শোষণ করে নেয়, যখন বস্তু দুটির কম্পাংক পরস্পরের সমান হয়।

F এবং G এর মধ্যেকার বিভব প্রভেদ আরও বাড়ালে উপরোক্ত তড়িৎ প্রবাহ আবার বৃদ্ধি পায়, কারণ তখন অনুনাদী সংঘাত ঘটে G থেকে কিছুটা পিছনে। ফলে পরমাণু সংলগ্ন ইলেকট্রনটিকে প্রথম শক্তিস্তর থেকে দ্বিতীয় স্তরে সংক্রমিত করে সম্পূর্ণ শক্তিহীন হয়ে যাবার পরেও বহিরাগত ইলেকট্রনটি আবার কিছুটা অতিরিক্ত শক্তি অর্জন করে G অ্যানোডে উপস্থিত হয়, যার ফলে সেটি G এবং P এর মধ্যেকার প্রতিবন্ধ বিভব জনিত বিকর্ষণ উপেক্ষা করে P সংগ্রাহকের উপরে আপতিত হতে সমর্থ হয়।

F এবং G এর মধ্যের বিভব-প্রভেদ পরিবর্তনের সংগে মাপক যন্ত্র কর্তৃক নির্দেশিত তড়িৎ প্রবাহের উপরে বর্ণিত পরিবর্তন (3·16) চিত্রে লেখ-চিত্রাকারে দেখান হয়েছে। এই চিত্র থেকে দেখা যায় যে সহসা হ্রাস পাবার পর বিভব প্রভেদ বৃদ্ধির সংগে তড়িৎ প্রবাহ আবার বাড়তে আরম্ভ করে। F ও G এর মধ্যের বিভব প্রভেদ যখন অনুনাদ-বিভবের দ্বিগুণ হয়, তখন তড়িৎ প্রবাহ পুনরায় দ্বিতীয়বার সহসা হ্রাস পায়। বিভব-প্রভেদ

চিত্র 3.16
ফ্র্যাংক ও হার্ৎসের পরীক্ষায় বিভব প্রভেদ
এবং প্রবাহ পরিবর্তনের লেখচিত্র।

বাড়ানর সংগে তড়িৎ প্রবাহের এইরূপ পর্যায়ক্রমে বৃদ্ধি এবং পরে সহসা হ্রাস বারবার ঘটতে থাকে। (3·16) লেখচিত্রে তড়িৎ প্রবাহের এইরূপ বারবার হ্রাস-বৃদ্ধি দেখান হয়েছে। তড়িৎ প্রবাহের শীর্ষগুলি যে সব

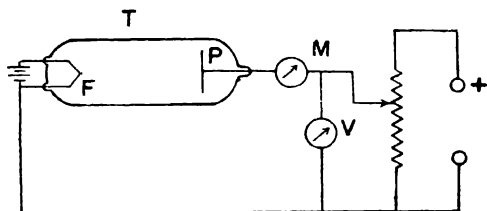
বিভবে আবির্ভূত হয়, তাদের মান অনুনাদ বিভবের পূর্ণ গুণিতক হয়। স্পষ্টতঃ পর পর যে কোন দুটি প্রবাহ শীর্ষ যে বিভবে আবির্ভূত হয় তাদের ব্যবধান অনুনাদ বিভবের সমান হয়।

তড়িৎ প্রবাহের এইরূপ পর্যায়ক্রমে পুনঃ পুনঃ বৃদ্ধি এবং হ্রাস সহজেই ব্যাখ্যা করা যায়। আঘাতকারী ইলেকট্রনের শক্তি যখন পরমাণুর উপরোক্ত শক্তিস্তর দুটির শক্তি ব্যাবধানের দ্বিগুণ হয়, তখন সেটি F এবং G এর মধ্যবর্তী স্থানে পরপর দুবার দুটি পরমাণুর সংগে অস্থিতিস্থাপক সংঘাত প্রাপ্ত হয়। প্রথম সংঘাত ঘটে F থেকে G পর্যন্ত যাবার ঠিক অর্ধপথ অতিক্রম করার পর, দ্বিতীয় সংঘাত ঘটে G অ্যানোডের ঠিক পিছনে। ফলে ইলেকট্রনটির দুই দফায় অর্জিত শক্তি উক্ত পরমাণু দুটিতে হস্তান্তরিত হয় এবং পরমাণু দুটি এক শক্তিস্তর থেকে অন্য স্তরে সংক্রমিত হয়। দুইবার সংঘাতের পরে শক্তিহীন ইলেকট্রনটি প্রতিবন্ধ বিভব কাটিয়ে G থেকে P তে পৌছতে পারে না। এইভাবে তড়িৎ প্রবাহের দ্বিতীয়বার হ্রাস পাবার কারণ ব্যাখ্যা করা যায়। অনুরূপে লেখচিত্রে প্রদর্শিত অন্যান্য প্রবাহ শীর্ষগুলির আবির্ভাব ঘটে অধিকতর সংখ্যক সংঘাতের জন্য। স্পষ্টতঃ এগুলি যেসব বিভবে আবির্ভূত হয় তা অনুনাদ বিভবের পূর্ণ গুণিতক হয়।

এখানে উল্লেখযোগ্য যে বোরের তত্ত্ব অনুযায়ী হাইড্রোজেন পরমাণুর ভৌম অবস্থার (Ground State), অর্থাৎ নিম্নতম শক্তিস্তরের $(n=1)$ শক্তি হচ্ছে $-13 \cdot 6$ ই-ভো, আর তার ঠিক উপরের স্তরের $(n=2)$ শক্তি হচ্ছে $-3 \cdot 4$ ই-ভো ($3 \cdot 1$ সারণী দ্রষ্টব্য)। এই দুই শক্তিস্তরের শক্তির ব্যবধান হচ্ছে $10 \cdot 2$ ই-ভো। অনুনাদ বিভব সম্পর্কিত পরীক্ষায় হাই-ড্রোজেনের ক্ষেত্রে অনুনাদ বিভবের মান পাওয়া যায় $10 \cdot 2$ ভোল্ট। এর থেকে প্রমাণিত হয় যে উক্ত পরীক্ষায় বহিরাগত ইলেকট্রনটি অস্থিতি-স্থাপক (Inelastic) সংঘাতের দ্বারা হাইড্রোজেন পরমাণুকে ভৌম অবস্থা থেকে প্রথম উত্তেজিত অবস্থায় (Excited State) সংক্রমিত করে। বোরের তত্ত্ব অনুযায়ী উত্তেজিত পরমাণুটি পরমুহূর্তে ($10^{-8}$ সেকেণ্ডের মধ্যে) আবার নিম্নতর ভৌম অবস্থায় ফিরে যায় এবং এই সংক্রমণের ফলে পরমাণু থেকে সমীকরণ $(3 \cdot 14)$ দ্বারা নির্ধারিত $\nu_{21}$ কম্পাংকের আলোক নিঃসৃত হয় (3.5 অনুচ্ছেদ দ্রষ্টব্য)। বহিরাগত ইলেকট্রনের শক্তি যদি পরমাণুকে দ্বিতীয় উত্তেজিত অবস্থা $(n=3)$ পর্যন্ত সংক্রমিত করবার পক্ষে যথেষ্ট হয়, তাহলে সংঘাতের পর পরমাণুটি প্রথম বা দ্বিতীয় যে কোন উত্তেজিত অবস্থায় সংক্রমিত হতে পারে।

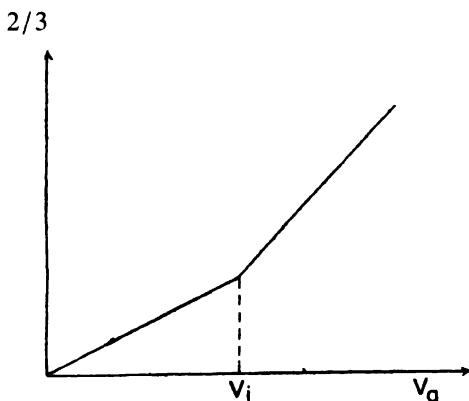
ফলে $\nu_{31}$, $\nu_{32}$ এবং $\nu_{21}$ এই তিনটি কম্পাংক সম্পন্ন বর্ণালী রেখা নিঃসৃত হতে পারে। ফ্র্যাংক ও হার্ৎসের উপরে বর্ণিত পরীক্ষার অল্প কিছুদিন পরেই হার্ৎস বর্ণালী-বিষয়ক (Spectroscopic) পরীক্ষার দ্বারা এইরূপ নিঃসৃত আলোকের তরঙ্গদৈর্ঘ্য পরিমাপ করে দেখান যে সেগুলি বোরের তত্ত্ব অনুযায়ী প্রত্যাশিত তরঙ্গদৈর্ঘ্যের সংগে সঠিক মিলে যায়।

## 3. 15 : আয়নন বিভব

(3·6) অনুচ্ছেদে আমরা দেখেছি যে পরমাণু থেকে একটি ইলেকট্রনকে সম্পূর্ণ বিচ্ছিন্ন করার জন্য প্রয়োজনীয় শক্তিকে বলা হয় আয়নন শক্তি (Ionization Energy)। এই শক্তি একটি বহিরাগত আলোক ফোটন বা বহিরাগত ইলেকট্রনের সাহায্যে সরবরাহ করা সম্ভব। (3·17) চিত্রে বহিরাগত ইলেকট্রনের সাহায্যে আয়নন-শক্তি পরিমাপের ব্যবস্থা দেখান

চিত্র 3.17
আয়নন বিভব পরিমাপ পদ্ধতি।

হয়েছে। T একটি আবদ্ধ নল যার মধ্যে তড়িৎ প্রবাহের সাহায্যে উত্তপ্ত F ধাতব তন্তু থেকে তাপীয় ইলেকট্রন নিঃসৃত হয়। ইলেকট্রনগুলিকে P অ্যানোডের উপর ধনাত্মক বিভব (F এর সাপেক্ষে) প্রয়োগ করে আকৃষ্ট করা হয়, যার ফলে সেগুলি গতিশক্তি অর্জন করে। P এর উপর যখন ইলেকট্রনগুলি আপতিত হয়, তখন M মাপক যন্ত্রে একটি তড়িৎ প্রবাহ নির্দেশিত হয়। T নলের মধ্যে অল্প পরিমাণে কোন মৌলের বাষ্প বা গ্যাস নিম্নচাপে রাখা থাকে। F এবং P এর মধ্যে বিভব প্রভেদ $V$ বাড়ালে, M কর্তৃক নির্দেশিত প্রবাহ $V^{3/2}$ সূত্র (চাইল্ড-ল্যাংমুইর সূত্র) অনুযায়ী বাড়তে থাকে। দেখা যায় যে একটি নির্দিষ্ট বিভব প্রভেদে উক্ত তড়িৎ প্রবাহের বৃদ্ধির হার সহসা খুব উচ্চ হয়ে যায়। (3·18) চিত্রে

তড়িৎ প্রবাহের এই পরিবর্তন লেখচিত্রকারে দেখান হয়েছে। প্রবাহ মাত্রা বৃদ্ধির হারের এইরূপ সহসা পরিবর্তনের কারণ হচ্ছে যে F এবং P এর

2/3

চিত্র 3.18
ইলেকট্রন ত্বরণ-বিভব এবং প্রবাহ পরিবর্তনের লেখচিত্র।

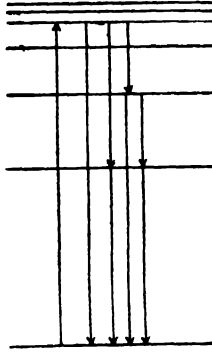
মধ্যের বিভব প্রভেদ যখন উপরোক্ত নির্দিষ্ট বিভব ($V_1$) অপেক্ষা বেশী হয়, তখন তাপীয় ইলেকট্রন কর্তৃক অর্জিত শক্তি নল মধ্যস্থ মৌলের পরমাণুর আয়নন শক্তির সমান অথবা উচ্চতর হয়। এই অবস্থায় তারা উক্ত পরমাণুগুলিকে সংঘাতের দ্বারা আয়নিত করতে আরম্ভ করে (1·7 অনুচ্ছেদ দ্রষ্টব্য), যার ফলে পরমাণু সংলগ্ন ইলেকট্রনগুলি বিচ্ছিন্ন হয়ে বহিরাগত তাপীয় ইলেকট্রনের দল ভারী করে। এই কারণে উপরোক্ত নির্দিষ্ট বিভবের উপরে P অ্যানোডে আপতিত ইলেকট্রনের সংখ্যা দ্রুততর হারে বৃদ্ধি পায়।

F এবং P এর মধ্যে প্রযুক্ত যে নির্দিষ্ট বিভবে ইলেকট্রনগুলি আয়নন শক্তি অর্জন করে তাকে বলা হয় 'আয়নন-বিভব' (Ionization Potential)। এই আয়নন-বিভব এবং (3·14) অনুচ্ছেদে আলোচিত অনুনাদ-বিভব, উভয়কেই বলা হয় 'সংকট-বিভব' (Critical Potential)।

হাইড্রোজেনের ক্ষেত্রে উপরে বর্ণিত পদ্ধতিতে পরিমিত আয়নন বিভবের মান পাওয়া যায় 13·6 ভোল্ট। বর্ণালী-বিষয়ক পরীক্ষা থেকে প্রাপ্ত হাইড্রোজেনের আয়নন শক্তির সংগে এই মানের ভাল সংগতি পাওয়া যায়। সংকট বিভব সম্পর্কিত পরীক্ষাগুলি থেকে বোর তত্ত্বে কল্পিত পরমাণবিক শক্তিস্তরের অস্তিত্ব সন্দেহাতীত ভাবে প্রমাণিত হয়।

## 3. 16 : প্রতিপ্রভা ও অনুপ্রভা

বর্তমানে গৃহ, দোকান, অফিস প্রভৃতি আলোকিত করার জন্য 'প্রতিপ্রভ বাতি' (Fluorescent Lamp) বহুল পরিমাণে ব্যবহৃত হয়। এই বাতির কার্য্য-প্রণালী 'প্রতিপ্রভা' (Fluorescence) নামক সংঘটনের উপর নির্ভর-শীল। পরমাণুর মধ্যে শক্তিস্তরের অস্তিত্ব কল্পনা করে এই সংঘটনের ব্যাখ্যা করা সম্ভব। প্রতিপ্রভ বাতির মধ্যে পারদ বাষ্প থাকে। তার ভিতর দিয়ে তড়িৎ মোক্ষণ করা হয়, যার ফলে পারদের পরমাণুগুলি থেকে আলোক নিঃসৃত হতে থাকে। পারদের বর্ণালী বিশ্লেষণ করলে দেখা যায় যে তার মধ্যে কতকগুলি বর্ণালী রেখা দৃশ্যমান অঞ্চলে থাকে, কিন্তু বেশীর ভাগ বর্ণালী রেখাই অতিবেগনী (Ultra Violet) অঞ্চলে থাকে। এর মধ্যে একটি রেখা অতিশয় উজ্জ্বল। প্রতিপ্রভ বাতির কাঁচ নলের ভিতরের দিকে বেরিয়াম প্ল্যাটিনো সায়ানাইড (Barium Platino Cyanide) বা দস্তার অক্সাইড (ZnO) বা সমজাতীয় কোন প্রতিপ্রভ দ্রব্যের প্রলেপ দেওয়া থাকে। এই দ্রব্যগুলিকে বলা হয় 'ফসফর' (Phosphor)। প্রতিপ্রভ বাতি মধ্যস্থ পারদ পরমাণু থেকে নিঃসৃত অতিবেগনী রশ্মি এইসব দ্রব্য কর্তৃক শোষিত হয়; ফলে এদের মধ্যেকার পরমাণুগুলি স্বাভাবিক অবস্থা থেকে উত্তেজিত অবস্থায় উন্নীত হয়। পরমুহূর্তে যদি এই উত্তেজিত পরমাণুগুলি আবার এক লাফে তাদের স্বাভাবিক অবস্থায় ফিরে আসে তাহলে তারা পূর্বের উত্তেজক অতিবেগনী আলোকই আবার নিঃসৃত করে। কিন্তু সাধারণতঃ উত্তেজিত পরমাণু-গুলি ধাপে ধাপে স্বাভাবিক অবস্থায় ফিরে আসে (3·19 চিত্র দ্রষ্টব্য)। প্রতি ধাপে যে রশ্মি নিঃসৃত হয় তার কম্পাংক আদি উত্তেজক অতিবেগনী আলোকের কম্পাংক অপেক্ষা কম হয়। এই রশ্মিগুলি সাধারণতঃ দৃশ্যমান অঞ্চলে অবস্থিত থাকে। ফলে প্রতিপ্রভ বাতি থেকে দৃশ্যমান আলোক নির্গত হয়। উচ্চতর কম্পাংক সম্পন্ন আলোকের ক্রিয়ায় নিম্নতর কম্পাংকের আলোক নিঃসরণকে বলা হয় 'প্রতিপ্রভা' (Fluorescence)।

বোর তত্ত্ব থেকে জানা আছে যে উত্তেজিত অবস্থায় পরমাণুগুলি $10^{-8}$ সেকেণ্ডের মত অবস্থান করে। কিন্তু কোন কোন দ্রব্যের পরমাণুর মধ্যে এমন কতকগুলি উত্তেজিত অবস্থা থাকে যেখানে উন্নীত হলে পরমাণু-সমূহ অনেক দীর্ঘতর সময় উত্তেজিত অবস্থায় অবস্থান করতে পারে। এই অবস্থাগুলিকে 'অর্ধস্থায়ী অবস্থা' (Metastable State) বলা যায়। উত্তেজক বিকিরণের (Exciting Radiation) প্রভাবে যদি

চিত্র 3.19
প্রতিপ্রভার উৎপত্তি
নির্দেশক শক্তিস্তর
চিত্র।

পরমাণুগুলি এইরূপ কোন অর্ধস্থায়ী অবস্থায় উন্নীত হয়, তাহলে নিম্নতর শক্তিস্তরগুলিতে ফিরে আসতে তাদের অনেক বেশী সময় লাগে। ফলে উত্তেজক আলোকের উৎস অপসারিত করার পরেও দীর্ঘ সময় ধরে এই জাতীয় বস্তু আলোক নিঃসৃত করতে থাকে। এই জাতীয় বস্তুকে 'অনুপ্রভ বস্তু' এবং এই সংঘটনকে 'অনুপ্রভা' (Phosphorescence) বলা যায়। বস্তুতঃ অনুপ্রভা প্রতিপ্রভার রূপান্তর মাত্র। ব্যবহারিক ক্ষেত্রে অন্ধকারে বিজলী বাতির সুইচ বা এলার্ম ঘড়ির টেপা বোতাম প্রভৃতি দীপ্তিমান রাখার জন্য অনেক সময় অনুপ্রভ দ্রব্য ব্যবহার করা হয়।

# পরিচ্ছেদ 4

# আলোক-তাড়িত এবং তাপীয় ইলেকট্রন নিঃসরণ

## 4. 1 : ইলেকট্রন নিঃসরণ

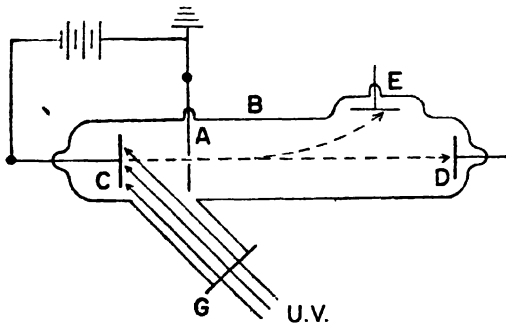
ইতিপূর্বে আমরা দেখেছি যে ইলেকট্রনগুলি কেন্দ্রকের আকর্ষণী বলের প্রভাবে পরমাণুর মধ্যে আবদ্ধ থাকে। পরমাণু দেহ থেকে তাদের বিচ্ছিন্ন করতে হলে একটা ন্যূনতম শক্তি ইলেকট্রনগুলিকে দিতে হয় (3.6 অনুচ্ছেদ দ্রষ্টব্য)। এই শক্তি বাইরে থেকে সরবরাহ করার প্রয়োজন। কোন বস্তুকে উত্তপ্ত করে বা তার উপরে আলোকপাত করে এই শক্তি সরবরাহ করা যেতে পারে। যথেষ্ট পরিমাণে উত্তপ্ত করলে অনেক বস্তু থেকে ইলেকট্রন নিঃসৃত হয়। এই সংঘটনকে তাপীয় ইলেকট্রন নিঃসরণ বা 'তাপায়ন নিঃসরণ' (Thermionic Emission) বলা হয়। আলোকপাতের ফলেও বিভিন্ন পদার্থ থেকে ইলেকট্রন নিঃসরণ হতে পারে। এই সংঘটনকে 'আলোক-তাড়িত নিঃসরণ' (Photo-Electric Emission) বলা হয়। বর্তমান পরিচ্ছেদে এই দুই প্রকার সংঘটন সম্বন্ধে বিশদভাবে আলোচনা করা হবে।

## 4. 2 : আলোক-তাড়িত ক্রিয়া

১৮৮৭ সালে জার্মান বিজ্ঞানী হাইনরিখ্ হার্ৎস্ (Heinrich Hertz) সম্পূর্ণ অপ্রত্যাশিত ভাবে এই নূতন ক্রিয়া আবিষ্কার করেন। তিনি লক্ষ্য করেন যে দুটি বিপরীত ধাতব তড়িৎদ্বারের (Electrodes) মধ্যবর্তী স্থানে যদি অতিবেগনী (Ultra Violet) আলোকপাত করা যায় তাহলে খুব সহজেই তড়িৎদ্বার দুটির মধ্যে স্ফুলিংগ (Spark) সৃষ্টি হয়। আলোকপাত না করলে অত সহজে স্ফুলিংগ সৃষ্টি হয় না। এর পরে হালভাখ্স (Hallwachs) নামক বিজ্ঞানী লক্ষ্য করেন যে একটি ঋণাত্মক আধান সম্পন্ন উজ্জ্বল দস্তার চাকতির উপর অতিবেগনী আলোকপাত করলে চাকতির ঋণাত্মক আধানের পরিমাণ কমে যায়। তাঁর পরীক্ষায় আরও দেখা যায় যে একটি আধানহীন চাকতি অতিবেগনী আলোকপাতের ফলে ধনাত্মক আধানে আহিত হয়। এই পরীক্ষাগুলি থেকে বোঝা যায় যে অতিবেগনী আলোকের প্রভাবে চাকতি থেকে ঋণাত্মক আধানবাহী কণিকা নিঃসৃত হয়। এরপরে এল্স্টার ও গাইটেল (Elster and Geitel) নামক দুইজন বিজ্ঞানী লক্ষ্য করেন যে সোডিয়াম, পটাসিয়াম, সিজিয়াম

প্রভৃতি ক্ষারীয় (Alkali) ধাতুর ক্ষেত্রে অতিবেগনী আলোক ছাড়াও দীর্ঘতর তরঙ্গদৈর্ঘ্য সম্পন্ন দৃশ্যমান আলোকের প্রভাবেও এইরূপ ঋণাত্মক আধান-বাহী কণিকা নিঃসৃত হয়। আলোকের প্রভাবে এইরূপ ঋণাত্মক কণিকা নিঃসরণকে আলোক-তাড়িত ক্রিয়া (Photo-Electric Effect) আখ্যা দেওয়া হয়। উপরে বর্ণিত পরীক্ষাগুলি থেকে প্রতীয়মান হয় যে দস্তা প্রভৃতি অপেক্ষাকৃত কম ধনাত্মক-তড়িৎধর্মী (Electro Positive) ধাতুর ক্ষেত্রে আলোক-তাড়িত ক্রিয়া সংঘটিত করার জন্য ক্ষুদ্রতর তরঙ্গদৈর্ঘ্য সম্পন্ন অতিবেগনী আলোকের প্রয়োজন, আর সোডিয়াম প্রভৃতি উচ্চতর ধনাত্মক-তড়িৎধর্মী ধাতুর ক্ষেত্রে দীর্ঘতর তরঙ্গদৈর্ঘ্যের দৃশ্যমান আলোক হলেই চলে।

## 4. 3 : লেনার্ডের পরীক্ষা

আলোক-তাড়িত ক্রিয়ার ফলে নিঃসৃত ঋণাত্মক আধানবাহী আয়নের স্বরূপ নিরূপণ করেন সর্বপ্রথমে লেনার্ড (Lenard) নামক জার্মান বিজ্ঞানী ১৮৯৯ সালে। তিনি যে যন্ত্র ব্যবহার করে নিঃসৃত কণিকাগুলির আপেক্ষিক আধান ($e/m$) নির্ণয় করেন তা (4.1) চিত্রে দেখান হয়েছে।

চিত্র 4.1
আলোক তাড়িত ক্রিয়ার ফলে নিঃসৃত আহিত কণিকার $e/m$ নির্ণয়ের জন্য লেনার্ড কর্তৃক উদ্ভাবিত পরীক্ষা ব্যবস্থা। (U. V.-অতিবেগনী রশ্মির পথ)।

B একটি পাত্র যার মধ্যে পাম্পের সাহায্যে বায়ুর চাপ খুব নিম্নমানে রাখা হয়। এই পাত্রের মধ্যে অবস্থিত C তড়িৎদ্বারে ঋণাত্মক বিভব প্রয়োগ করা হয়। B পাত্রের একটি পার্শ্ব নল থাকে যার মুখ একটি স্ফটিক

(Quartz) নির্মিত ঢাকনীর (G) দ্বারা আবদ্ধ থাকে। এর মধ্য দিয়ে অতিবেগনী রশ্মি C তড়িৎদ্বারের উপর আপতিত করা যায়। C থেকে অল্পদূরে অবস্থিত A আর একটি তড়িৎদ্বার, যার কেন্দ্রস্থলে একটি ক্ষুদ্র বৃত্তাকার ছিদ্র থাকে। A তড়িৎদ্বারকে শূন্য বিভবে রাখা হয়। অর্থাৎ C প্লেটটির সাপেক্ষে A উচ্চতর ধনাত্মক বিভবে থাকে। অতিবেগনী আলোর প্রভাবে C থেকে যে সব ঋণাত্মক কণিকা নির্গত হয়ে A প্লেটের দিকে আকৃষ্ট হয় তাদের মধ্যে কিছু সংখ্যক এর ছিদ্রের মধ্য দিয়ে নির্গত হয়ে একটি রশ্মিগুচ্ছের আকারে এর পিছন দিকে অবস্থিত D ধাতব চাকতির উপর আপতিত হয়ে একটি ক্ষীণ তড়িৎপ্রবাহের সৃষ্টি করে। D চাকতির সংগে সংযুক্ত একটি ইলেকট্রোমিটারের সাহায্যে এই তড়িৎ-প্রবাহ নির্দেশিত হয়।

B পাত্রটিকে দুটি চৌম্বক মেরুর মধ্যে রাখা হয় যাতে প্রয়োজনমত এর উপরে চৌম্বকক্ষেত্র প্রয়োগ করা যায়। মনে করা যাক যে (4.1) চিত্রে এই চৌম্বকক্ষেত্র পুস্তকের পাতার অভিলম্বে ক্রিয়া করে। চৌম্বকক্ষেত্রের প্রভাবে ঋণাত্মক কণিকাগুলি বিচ্যুত হয়ে একটি বৃত্তচাপ আকৃতি বিশিষ্ট পথে পরিভ্রমণ করে D চাকতির পরিবর্তে E চাকতির উপর আপতিত হয়। এর ফলে E চাকতির সঙ্গে সংযুক্ত একটি ইলেকট্রোমিটার তড়িৎপ্রবাহ নির্দেশ করে।

জ্যামিতিক বিন্যাস থেকে ঋণাত্মক আয়নগুলির পরিভ্রমণ পথের ব্যাসার্ধ $R$ নিরূপণ করা যায়। চৌম্বকক্ষেত্র $H$ এবং ব্যাসার্ধ $R$ থেকে আলোক-পাতের ফলে C থেকে নিঃসৃত ঋণাত্মক কণিকাগুলির $e/m$ পরিমাপ করা যায়। যদি C এবং A প্লেট দুটির মধ্যে বিভব প্রভেদ হয় $V$, তাহলে নিঃসৃত কণিকাগুলির গতিশক্তি হয়

$$\tfrac{1}{2}\,mv^2 = eV$$

চৌম্বকক্ষেত্রে আয়নগুলির উপর ক্রিয়াশীল বল অপকেন্দ্রিক বলের সংগে সমান হয়ঃ

$$He\,v/c = \frac{mv^2}{R}$$

এখানে $e$ এবং $V$ পরিমিত হয় স্থিরতড়িৎ এককে (*e.s.u.*); $H$ পরিমিত হয় তড়িৎ চুম্বকীয় এককে (*e.m.u.*)। উপরের সমীকরণ দুটি থেকে পাওয়া যায়

$$e/mc = \frac{2Vc}{H^2R^2} \qquad (4.1)$$

লেনার্ড তাঁর পরিমাপ দ্বারা প্রমাণ করেন যে আলোকপাতের ফলে বিভিন্ন ধাতুতল থেকে যে ঋণাত্মক কণিকাগুলি নিঃসৃত হয় সেগুলি ইলেকট্রন ছাড়া আর কিছুই নয়।

লেনার্ডের পরীক্ষা থেকে আরও দেখা যায় যে C তড়িৎদ্বারের উপর ঋণাত্মক বিভব প্রয়োগ না করে ধনাত্মক বিভব প্রয়োগ করলে D চাকতিতে পরিমিত তড়িৎপ্রবাহ কমে যায়। এর কারণ শূন্য বিভব সম্পন্ন A তখন C প্লেটের সাপেক্ষে ঋণাত্মক হয়ে যায় যার ফলে ইলেকট্রনগুলির উপর বিকর্ষণী বল ক্রিয়া করে এবং A প্লেটের দিকে তাদের আগমন প্রতিহত হয়। C প্লেটের ধনাত্মক বিভব বাড়াতে থাকলে অবশেষে তড়িৎপ্রবাহ একেবারেই স্তব্ধ হয়ে যায়। মনে করা যাক যে এই অবস্থায় C এবং A প্লেটদুটির মধ্যেকার বিভব প্রভেদের মান $V_0$ হয়। $V_0$ হচ্ছে 'নিরোধ বিভব' (Stopping Potential)। যদি C থেকে নিঃসৃত দ্রুততম ইলেকট্রনগুলির বেগ হয় $v_m$, তাহলে স্পষ্টতঃ আমরা লিখতে পারি

$$\frac{1}{2} m v_m^2 = eV_0 \quad (4.2)$$

অর্থাৎ নিরোধ বিভব $V_0$ প্রয়োগের ফলে দ্রুততম ইলেকট্রনগুলিও বিপরীতমুখী বলের ক্রিয়ার জন্য A পর্য্যন্ত পৌছতে পারে না। $V_0$ সাধারণতঃ মাত্র কয়েক ভোল্টের বেশী হয় না। উপরোক্ত পরীক্ষা থেকে বোঝা যায় যে আলোকপাতের ফলে ধাতব চাকতি থেকে ইলেকট্রনগুলি কিছু পরিমাণ গতিশক্তি সহকারে নির্গত হয় এবং তাদের নিঃসরণ বেগ শূন্য থেকে একটা বৃহত্তম সীমা পর্য্যন্ত বিস্তৃত থাকে। লেনার্ডের পরীক্ষা থেকে দেখা যায় যে এই বৃহত্তম বেগ ($v_m$) আলোকের তীব্রতার উপর নির্ভর করে না, নির্ভর করে আলোকের তরঙ্গদৈর্ঘ্যের উপর। তরঙ্গদৈর্ঘ্য যত ছোট হয়, $v_m$ তত উচ্চ হয়।

এখানে উল্লেখযোগ্য যে C প্লেটের উপর যখন ঋণাত্মক বিভব প্রয়োগ করা হয়, তখন শূন্য বিভবে রাখা A প্লেটের আকর্ষণী বলের প্রভাবে অর্জিত ইলেকট্রনগুলির বেগ নিঃসরণ বেগ অপেক্ষা বেশী হয়। বস্তুত লেনার্ডের পরীক্ষায় এই অর্জিত বেগ ইলেকট্রনের বৃহত্তম নিঃসরণ বেগ $v_m$ অপেক্ষা বহুগুণ বেশী ছিল। সেইজন্য $e/m$ নির্ণয় করবার সময় (সমীকরণ 4.1 দ্রষ্টব্য) উক্ত নিঃসরণ বেগ উপেক্ষা করা হয়েছিল।

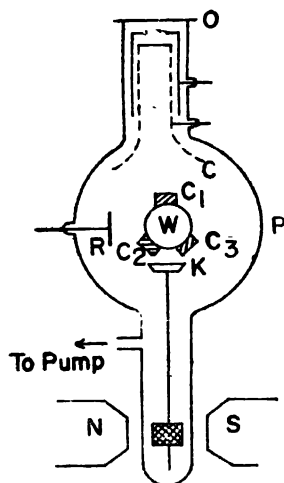
লেনার্ডের এবং আরও অনেকের পরীক্ষা থেকে আর একটি খুব গুরুত্বপূর্ণ বিষয় প্রতীয়মান হয়। আলোক-তাড়িত প্রবাহের মাত্রা নির্ভর করে আলোকের তীব্রতার উপর, তরঙ্গদৈর্ঘ্যের উপর নয়।

লেনার্ডের পরে রিচার্ডসন (Richardson) ও কম্পটন (Compton) নামক দুই আমেরিকান বিজ্ঞানী সূক্ষ্মতর যন্ত্র ব্যবহার করে আলোক-তাড়িত ক্রিয়া সম্বন্ধে কতকগুলি পরীক্ষা অনুষ্ঠিত করেন। তাঁদের পরীক্ষার ফল থেকেও উপরে আলোচিত লেনার্ডের সিদ্ধান্তগুলি সমর্থিত হয়।

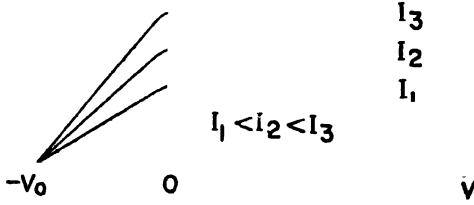
এইসব পরীক্ষালব্ধ ফলাফলের উপর ভিত্তি করে আইনষ্টাইন (Albert Einstein) ১৯০৫ সালে আলোক-তাড়িত ক্রিয়ার একটি নূতন তত্ত্ব উদ্ভাবিত করেন। এই তত্ত্ব সদ্য আবিষ্কৃত প্ল্যাংকের কোয়ানটাম মতবাদের উপর ভিত্তি করে প্রতিষ্ঠিত হয় এবং পদার্থবিদ্যার সনাতন তত্ত্বের পরিপন্থী ছিল। বিষয়টির গুরুত্ব উপলব্ধি করে হিউজেস্ (Hughes), মিলিকান (Millikan) প্রভৃতি বিজ্ঞানীরা তাঁদের পূর্বসূরীগণের পরীক্ষালব্ধ তথ্যগুলির সত্যতা যাচাই করার জন্য সূক্ষ্মতর ব্যবস্থার সাহায্যে নূতন করে উপরোক্ত পরীক্ষাগুলি পুনরনুষ্ঠিত করেন।

### 4. 4 : মিলিকানের পরীক্ষা

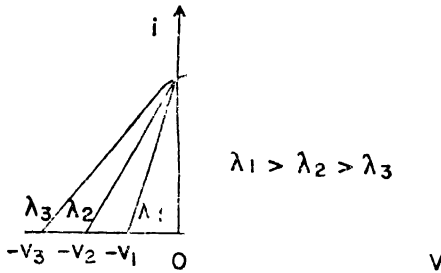
১৯১৬ সালে অনুষ্ঠিত মিলিকানের পরীক্ষা ব্যবস্থা (4.2) চিত্রে দেখান হয়েছে। মিলিকান ক্ষারীয় (Alkali) ধাতু নিয়ে পরীক্ষা করেন, যাতে দৃশ্যমান এবং অতিবেগনী দুইপ্রকার আলোকের সাহায্যেই ফোটো-ইলেকট্রন

চিত্র 4.2

মিলিকান কর্তৃক উদ্ভাবিত আলোক-তাড়িত নিঃসরণ সম্পর্কিত পরীক্ষা ব্যবস্থা।

নিঃসৃত করা যায়। P পাত্রের ভিতরে অবস্থিত W চক্রটির উপরে সোডিয়াম, পটাসিয়াম প্রভৃতি ক্ষারীয় ধাতুর এক একটি বেলনাকৃতি (Cylindrical) টুকরা ($C_1$, $C_2$, $C_3$ ইত্যাদি) পৃথক পৃথক ভাবে সংলগ্ন থাকে। বাইরে থেকে একটি বিশেষ ব্যবস্থার সাহায্যে চক্রটি আবর্তিত করা যায়, প্রত্যেকবার আবর্তনের সময় ক্ষারীয় ধাতুর টুকরাগুলি K ছুরিকাটির ধারালো প্রান্ত স্পর্শ করে চলে যায়। এর ফলে ছুরিকাটি ধাতুর টুকরাগুলির উপরতল চেঁছে পরিষ্কার করে দেয়। P পাত্রের এক-দিকে একটি স্ফটিক (Quartz) নির্মিত প্লেট O লাগান থাকে, যার ভিতর দিয়ে দৃশ্যমান বা অতিবেগনী রশ্মি প্রবেশ করে ধাতুর টুকরাগুলির সদ্য পরিষ্কৃত উপরিতলে আপতিত হয়ে ফোটো ইলেকট্রন নিঃসৃত করতে পারে। P পাত্রটি খুব নিম্ন বায়ুচাপে রাখা হয়। O প্লেটটির নীচে একটি বেলনাকৃতি সংগ্রাহক জালি (Collector) C রাখা থাকে, যার ভিতর দিয়ে আলোক রশ্মি বাইরে থেকে সহজেই পাত্রের মধ্যে প্রবেশ করতে পারে। সংগ্রাহক জালিটি জারিত তামার তার দ্বারা নির্মিত হয় বলে আপতিত আলোকের প্রভাবে এর থেকে কোন ফোটো-ইলেকট্রন নিঃসৃত হয় না। সংগ্রাহকের সংগে সংযুক্ত একটি ইলেকট্রমিটারের সাহায্যে আলোক-তাড়িত প্রবাহ পরিমাপ করার ব্যবস্থা থাকে। সংগ্রাহক জালি C এবং W চক্রের মধ্যে বিভিন্ন বিভব প্রভেদ প্রয়োগ করা যায়।

মিলিকান তাঁর পরীক্ষায় বিভিন্ন তরংগদৈর্ঘ্য সম্পন্ন একবর্ণী আলোক রশ্মি ব্যবহার করে $C_1$, $C_2$ প্রভৃতি ক্ষারীয় ধাতুর টুকরাগুলি থেকে উদ্ভূত আলোক-তাড়িত প্রবাহ পরিমাপ করেন। প্রথমতঃ তরঙ্গদৈর্ঘ্য অপরিবর্তিত রেখে আপতিত আলোকের তীব্রতা পরিবর্তন করে তিনি আলোক-তাড়িত প্রবাহ মাত্রা পরিমাপ করেন। তাঁর পরীক্ষালব্ধ ফল (4.3) চিত্রে দেখান হয়েছে। এই চিত্রে C এবং W এর মধ্যেকার বিভব প্রভেদ পরিবর্তনের সংগে আলোক-তাড়িত প্রবাহের পরিবর্তন লেখচিত্রাকারে দেখান হয়েছে। W চক্রের সাপেক্ষে C তারজালির বিভব ধনাত্মক রাখলে এই প্রবাহের মান প্রায় ধ্রুবক হয়। C এর বিভব যদি ঋণাত্মক করা যায় তাহলে প্রবাহ কমতে থাকে এবং অবশেষে এই বিভবের একটি নির্দিষ্ট মানে ($-V_o$) প্রবাহ সম্পূর্ণ স্তব্ধ হয়ে যায়। পূর্বেই বলা হয়েছে যে $V_o$ বিভবকে নিরোধ বিভব (Stopping Potential) বলা হয়। (4.3) চিত্র থেকে বোঝা যায় যে আপতিত আলোকের তীব্রতা যাই হোক না কেন নির্দিষ্ট তরঙ্গদৈর্ঘ্য সম্পন্ন আলোক ব্যবহার করলে নিরোধ বিভবের মান অপরিবর্তিত থাকে। তীব্রতা বাড়ালে শুধু সম্পৃক্ত প্রবাহের মাত্রা বৃদ্ধি পায়।

চিত্র 4.3

বিভব পরিবর্তনের সংগে আলোক তাড়িত প্রবাহ পরিবর্তনের লেখচিত্র। $I_1$, $I_2$, $I_3$ হচ্ছে বিভিন্ন ক্ষেত্রে আপতিত আলোকের তীব্রতা।

এরপর মিলিকান বিভিন্ন তরঙ্গদৈর্ঘ্যের আলোক রশ্মি নিয়ে পরীক্ষা করেন। (4.4) চিত্রে তাঁর পরীক্ষালব্ধ ফল লেখচিত্রাকারে দেখান হয়েছে।

চিত্র 4.4

বিভিন্ন তরঙ্গদৈর্ঘ্য সম্পন্ন আলোকের ক্রিয়ায় আলোক-তাড়িত প্রবাহ পরিবর্তনের লেখচিত্র। $\lambda_1$, $\lambda_2$, $\lambda_3$ হচ্ছে বিভিন্ন ক্ষেত্রে আপতিত আলোকের তরঙ্গদৈর্ঘ্য।

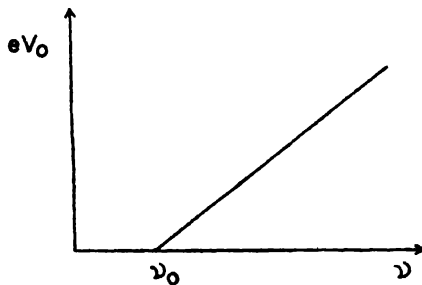
পূর্বের মত এক্ষেত্রেও নির্দিষ্ট তরঙ্গদৈর্ঘ্য ($\lambda_1$) সম্পন্ন আলোক ব্যবহার করে C এর উপরে ধনাত্মক বিভব প্রয়োগ করলে আলোক-তাড়িত প্রবাহ সম্পৃক্ত হয়, আর ঋণাত্মক বিভব প্রয়োগ করলে প্রবাহ মাত্রা কমতে থাকে

এবং অবশেষে ($-V_1$) নিরোধ বিভবে প্রবাহ শূন্য হয়ে যায়। মিলিকান বিভিন্ন তরঙ্গদৈর্ঘ্যের আলোকের তীব্রতা এমন ভাবে নিয়ন্ত্রিত করেন যে সম্পৃক্ত আলোক-তাড়িত প্রবাহ সব ক্ষেত্রেই সমান থাকে। এখানে উল্লেখ-যোগ্য যে C এর উপর প্রযুক্ত বিভব পরিমাপ করবার সময় স্পর্শ-বিভব (Contact Potential) জনিত কিছুটা ত্রুটি এসে যায়। মিলিকান P আধার মধ্যস্থ প্ল্যাটিনাম নির্মিত আর একটি তড়িৎদ্বার R এর সাহায্যে এই ত্রুটি সংশোধন করেন। (4.4) লেখচিত্রে বিভবের এই সংশোধিত মান দেখান হয়েছে। চিত্র থেকে বোঝা যায় যে তরঙ্গদৈর্ঘ্য কমালে বা কম্পাংক বাড়ালে, অর্থাৎ দৃশ্যমান থেকে অতিবেগনী আলোকের দিকে গেলে, নিরোধ বিভব ক্রমশঃ বাড়তে থাকে।

আলোক-তাড়িত ক্রিয়া সম্বন্ধে বিভিন্ন পরীক্ষা থেকে নিম্নলিখিত গুরুত্ব-পূর্ণ তথ্যগুলি জানা যায়ঃ

(ক) আলোক-তাড়িত প্রবাহমাত্রা আলোকের তীব্রতার উপর নির্ভর করে, আলোকের কম্পাংক বা তরঙ্গদৈর্ঘ্যের উপর নির্ভর করে না।

(খ) নিঃসৃত ফোটো ইলেকট্রনগুলির একটি বৃহত্তম নিঃসরণ বেগ বা নিঃসরণ গতিশক্তি থাকে যা আলোকের কম্পাংকের (বা তরঙ্গদৈর্ঘ্যের) উপর নির্ভর করে, আলোকের তীব্রতার উপর নির্ভর করে না। উক্ত নিঃসরণ গতিশক্তি ($\frac{1}{2}mv^2_m = eV_o$) আলোকের কম্পাংকের সংগে একঘাতে বৃদ্ধি পায়। অর্থাৎ কম্পাংক $\nu$ এর সংগে উক্ত গতিশক্তির পরিবর্তনের লেখচিত্র একটি সরলরেখা হয় (4.5 চিত্র দ্রষ্টব্য)।

(গ) আলোক-তাড়িত ক্রিয়া আলোকপাতের সংগে সংগেই সংঘটিত হয়।

চিত্র 4.5

আলোকের কম্পাংকের সংগে নিঃসৃত ফোটো ইলেকট্রনের গতিশক্তি পরিবর্তনের লেখচিত্র।

অর্থাৎ ধাতুর উপর আলোকপাত এবং ধাতু থেকে ফোটো ইলেকট্রন নিঃসরণের মধ্যে কোন সময়ের ব্যবধান দেখা যায় না।

(ঘ) (4.5) চিত্রে সরলরেখা লেখচিত্রটি $\nu$-অক্ষকে একটি নির্দিষ্ট বিন্দুতে ছেদ করে। উক্ত বিন্দুতে কম্পাংকের মান যদি হয় $\nu_0$, তাহলে $\nu_0$ অপেক্ষা কম কম্পাংক সম্পন্ন আলোকপাত করলে পরীক্ষাধীন ধাতু থেকে ফোটো ইলেকট্রন নির্গত হয় না। এই ন্যূনতম কম্পাংককে বলা হয় 'সূচনা-কম্পাংক' (Threshold Frequency)। বিভিন্ন ধাতুর ক্ষেত্রে সূচনা-কম্পাংকের মান বিভিন্ন হয়।

## 4. 5 : তড়িৎচুম্বকীয় তত্ত্বের ব্যর্থতা

উপরে আলোচিত পরীক্ষালব্ধ তথ্যগুলি আলোকের তড়িৎচুম্বকীয় তত্ত্ব দ্বারা ব্যাখ্যা করা যায় না। উক্ত তত্ত্বে আলোককে একপ্রকার তরঙ্গ হিসাবে কল্পনা করা হয়, যার মধ্যে কম্পনশীল তড়িৎক্ষেত্র এবং চৌম্বক-ক্ষেত্র আলোকের বেগে প্রসার লাভ করে। এই তরঙ্গকে বলা হয় তড়িৎ-চুম্বকীয় তরঙ্গ। এই তরঙ্গ মধ্যস্থ তড়িৎক্ষেত্র এবং চৌম্বকক্ষেত্রের বিস্তারের উপর আলোকের তীব্রতা এবং শক্তি নির্ভর করে। যখন একটি পরমাণুর উপর আলোকপাত করা হয়, তখন তার দেহ সংলগ্ন ইলেকট্রন-গুলি উক্ত কম্পনশীল তড়িৎক্ষেত্র দ্বারা প্রভাবিত হয়। তড়িৎক্ষেত্রের বিস্তার (Amplitude) যত বেশী হয়, ইলেকট্রনটি তত বেশী শক্তি অর্জন করে। কাজেই এই তত্ত্ব অনুযায়ী নির্গত ইলেকট্রনের শক্তি আলোকের তীব্রতার (Intensity) উপর নির্ভর করা উচিত। কিন্তু প্রকৃতপক্ষে তা হয় না।

আবার এই তত্ত্ব অনুযায়ী আলোকের কম্পাংকের উপর নির্গত ফোটো ইলেকট্রনের গতিশক্তি নির্ভর করা উচিত নয়। যে কোন কম্পাংকের আলোকই ব্যবহার করা হোক না কেন, ইলেকট্রনটি আলোক তরঙ্গ থেকে প্রয়োজনীয় শক্তি সংগ্রহ করার মত সময় পেলে অবশেষে পরমাণু দেহ থেকে বিচ্ছিন্ন হয়ে নির্গত হওয়া উচিত। আমরা জানি যে তরঙ্গের শক্তি সমগ্র তরঙ্গ-তলের (Wave Front) উপর বিস্তৃত থাকে। যেহেতু ইলেকট্রনগুলি আয়তনে অতি ক্ষুদ্র, অতএব তরঙ্গ-তলের অতি স্বল্পাংশই ইলেকট্রনের উপর আপতিত হয়; সুতরাং ইলেকট্রনটি তরঙ্গের শক্তির অতি স্বল্পাংশই এককালে পেয়ে থাকে। তরঙ্গের পর তরঙ্গ যখন ইলেকট্রনের উপর দিয়ে প্রবাহিত হয়ে যায়, সেটি তখন প্রতি তরঙ্গ-তল থেকে অল্প অল্প পরিমাণ শক্তি সংগ্রহ করতে থাকে; অবশেষে যথেষ্ট পরিমাণ শক্তি সংগ্রহ

করার পর সেটি পরমাণু দেহ থেকে বিচ্ছিন্ন হতে পারে। স্পষ্টতঃ এই কল্পিত প্রক্রিয়ায় ফোটো ইলেকট্রন নির্গত হতে বেশ কিছুটা সময় লাগবে। আলোকের তীব্রতা যত কম হবে এই সময়ের পরিমাণও তত বেশী হবে। আমরা ইতিপূর্বে দেখেছি যে এই সিদ্ধান্ত প্রকৃত ঘটনার পরিপন্থী। এখানে আর একটি কথা উল্লেখযোগ্য। আপতিত তড়িৎচুম্বকীয় তরঙ্গ বস্তুর সব পরমাণুর উপর সমভাবে ক্রিয়া করে। কাজেই বিশেষ কয়েকটি ইলেকট্রন তরঙ্গ থেকে শক্তি অর্জন করে নির্গত হবে, অন্যগুলি হবে না. এরকম হবার কোন কারণ নেই। সব ইলেকট্রনই যথেষ্ট সময় পেলে আপতিত আলোক তরঙ্গ থেকে শক্তি অর্জন করে নিঃসৃত হবে। সুতরাং আলোকের তীব্রতা পরিবর্তনের সংগে নিঃসৃত ফোটো ইলেকট্রনের সংখ্যার পরিবর্তন হবার কোন কারণ নেই। কিন্তু প্রকৃতপক্ষে আলোকের তীব্রতা বাড়ালে নিঃসৃত ইলেকট্রনের সংখ্যাও বাড়ে।

## 4. 6 : আইনষ্টাইনের আলোক-তাড়িত সমীকরণ; আলোক কোয়ানটাম মতবাদ

ইতিপূর্বে আমরা দেখেছি যে ফোটো ইলেকট্রনগুলির বৃহত্তম নিঃসরণ গতিশক্তি $\frac{1}{2}mv_m^2 = eV_0$ আপতিত আলোকের কম্পাংকের ($\nu$) সংগে একঘাতে বৃদ্ধি পায় (4.5 চিত্র দ্রষ্টব্য)। এইরকম একঘাত পরিবর্তন নিম্নলিখিত সমীকরণ দ্বারা প্রকাশ করা যায়ঃ

$$eV_0 = a\nu - \varepsilon_0$$

এখানে $a$ এবং $\varepsilon_0$ দুটি ধ্রুবক। মিলিকান এবং আরও অনেকে খুব সূক্ষ্ম পরীক্ষা দ্বারা পরিমাপ করে দেখান যে $a$ ধ্রুবকটির মান সব বস্তুর ক্ষেত্রে সমান হয় এবং এই মান প্ল্যাংক ধ্রুবক $h$ এর মানের সংগে সমান। অপরপক্ষে $\varepsilon_0$ ধ্রুবকটির মান বিভিন্ন বস্তুর ক্ষেত্রে বিভিন্ন। অতএব লেখা যেতে পারে যে

$$eV_0 = h\nu - \varepsilon_0 \tag{4.3}$$

এই সমীকরণে যদি $\nu = \nu_0 = \varepsilon_0/h$ বসান যায়, তাহলে নিঃসৃত ইলেকট্রনের গতিশক্তি শূন্য হয়। স্পষ্টতঃ আলোকের কম্পাংক $\nu$ এর মান $\nu_0$ অপেক্ষা কম হলে ফোটো ইলেকট্রন নিঃসৃত হবে না। $\nu_0$ হচ্ছে 'সূচনা-কম্পাংক', যার কথা পূর্বে উল্লেখ করা হয়েছে।

(4.3) সমীকরণকে বলা হয় আইনষ্টাইনের আলোক-তাড়িত সমীকরণ (Photoelectric Equation)।

১৯০৫ সালে আইনষ্টাইন এই সমীকরণটির উপর ভিত্তি করে আলোকের প্রকৃতি সম্বন্ধে এক নূতন তত্ত্বের প্রস্তাবনা করেন। এই তত্ত্বকে বলা হয় আইনষ্টাইনের আলোক-কোয়ানটাম মতবাদ (Light Quantum Hypothesis)।

আমরা পূর্বে দেখেছি (3.10 অনুচ্ছেদ দ্রষ্টব্য) যে ম্যাক্স্ প্ল্যাংক ১৯০০ সালে কৃষ্ণবস্তুর বিকিরণ (Black Body Radiation) সম্পর্কিত তত্ত্বে সর্বপ্রথম কোয়ানটাম মতবাদ অনুপ্রবিষ্ট করেন। তাঁর মূল বক্তব্য ছিল যে পরমাণবিক আয়তনের স্পন্দনশীল কণিকাসমূহ যখন তড়িৎচুম্বকীয় বিকিরণের সংগে শক্তি বিনিময় করে তখন সেই শক্তির মান একটি মূল এককের পূর্ণ গুণিতক হয়। এই মূল একককে বলা হয় শক্তির কোয়ানটাম এবং এর মান $h\nu$ হয়। এখানে $\nu$ হচ্ছে আলোকের কম্পাংক এবং $h$ একটি ধ্রুবক (প্ল্যাংক ধ্রুবক)। আইনষ্টাইন আরও একধাপ এগিয়ে যান। তিনি প্রস্তাব করেন শুধু যে আলোক এবং কণিকার মধ্যে বিনিমিত শক্তির মানই কোয়ানটায়িত হয় তা নয়, উৎস থেকে শক্তির ছোট ছোট পুলিন্দার (Bundle) আকারে নির্গত হয়ে আলোক সরলরেখা পথে অগ্রসর হতে থাকে। ঠিক যেমন বন্দুকের নল থেকে নির্গত বুলেট সামনের দিকে ছুটে চলে যায়। শক্তির এই কণিকা বা পুলিন্দাগুলিকে বলা হয় 'ফোটন' (Photon) বা 'আলোক কোয়ানটাম' (Light Quantum)। যদি আলোকের কম্পাংক হয় $\nu$, তাহলে একটি ফোটনের শক্তির পরিমাণ $h\nu$ হয়। কোন বিন্দুতে আলোকের তীব্রতা নির্ভর করে উক্ত বিন্দুতে প্রতি সেকেণ্ডে আলোকের গতিপথের অভিলম্বে স্থাপিত একক ক্ষেত্রফলের উপরে আপতিত এইরূপ ফোটনের সংখ্যার উপর।

আইনষ্টাইনের এই মতবাদের ভিত্তিতে আলোক-তাড়িত ক্রিয়া নিম্নলিখিত ভাবে ব্যাখ্যা করা সম্ভব। কোন ধাতুর উপর আলোকপাত করলে আপতিত কতকগুলি ফোটনের সংগে ধাতু মধ্যস্থ কতকগুলি ইলেকট্রনের সংঘাত হয়। ফলে এই সব ইলেকট্রন তাদের উপর আপতিত ফোটনের সম্পূর্ণ শক্তি ($h\nu$) শোষণ করে। যদি ফোটনের শক্তি ধাতুর উপরিতলস্থ ইলেকট্রনের বন্ধনশক্তি অপেক্ষা বেশী হয়, তাহলেই একটি ফোটো ইলেকট্রন নির্গত হতে পারে। স্পষ্টতঃ নির্গত ইলেকট্রনটির গতিশক্তি হবে শোষিত শক্তি $h\nu$ এবং বন্ধন শক্তি $\varepsilon$ এই দুইটি সংখ্যার অন্তরফলের সংগে সমান। অর্থাৎ $\frac{1}{2}mv^2 = h\nu - \varepsilon$ হবে। (4.10) অনুচ্ছেদে দেখা যাবে যে ধাতুতলে আবদ্ধ ইলেকট্রনগুলির বিভিন্ন পরিমাণ বন্ধনশক্তি থাকতে পারে। যখন এই বন্ধনশক্তি ন্যূনতম হয়, তখন নিঃসৃত ইলেকট্রনগুলির শক্তি উচ্চতম

হয়। যদি এই ন্যূনতম বন্ধনশক্তি $\varepsilon_0$ হয়, তাহলে নিঃসৃত ফোটো ইলেক-ট্রনের উচ্চতম শক্তি হবে

$$\frac{1}{2} m v_m^2 = h\nu - \varepsilon_0$$

$\varepsilon_0$ সংখ্যাটিকে বলা হয় 'নিষ্পাদনীয় কার্য্য' (Work Function)। (4.10) অনুচ্ছেদে এই সংখ্যাটি সম্বন্ধে বিশদভাবে আলোচনা করা হবে।

প্রতি সেকেণ্ডে নিঃসৃত ফোটো ইলেকট্রনের সংখ্যা নির্ভর করে ফোটনের আপতন হারের উপর। প্রতি সেকেণ্ডে যত বেশী সংখ্যক ফোটন আপতিত হয়, ততই ফোটন এবং ধাতু মধ্যস্থ ইলেকট্রনগুলির মধ্যে সংঘাতের সংখ্যাও বেড়ে যায়। কাজেই সিদ্ধান্ত করা যায় যে আলোক-তাড়িত প্রবাহ আলোকের তীব্রতার উপর নির্ভর করে, যা পরীক্ষালব্ধ তথ্যের সংগে সংগতিপূর্ণ।

যে মুহূর্তে $\varepsilon_0$ অপেক্ষা অধিকতর শক্তিসম্পন্ন একটি ফোটন ও একটি ইলেকট্রনের মধ্যে সংঘাত হয়, ইলেকট্রনটি সংগে সংগে ফোটনের সমস্ত শক্তি শোষণ করে নির্গত হয়। কাজেই আলোকের আপতন ও ফোটো ইলেরট্রনের নিঃসরণের মধ্যে কোন সময়ের ব্যবধান থাকে না। পরীক্ষার দ্বারা যে এই সিদ্ধান্তের সমর্থন পাওয়া যায় তা ইতিপূর্বে দেখা গেছে।

যদি আপতিত আলোকের কম্পাংক $\nu_0 = \varepsilon_0/h$ অপেক্ষা কম হয়, তাহলে ফোটনগুলির শক্তি ইলেকট্রনের বন্ধন শক্তি $\varepsilon_0$ অপেক্ষা কম হয়। এক্ষেত্রে যতক্ষণ ধরেই আলোকপাত করা যাক না কেন, কোনক্রমেই ফোটো ইলেকট্রন নিঃসৃত হবে না। কারণ ইলেকট্রন কর্তৃক শোষিত শক্তির পরিমাণ তার বন্ধনশক্তি অপেক্ষা কম হয়। কাজেই ইলেকট্রনগুলি ধাতুদেহের বন্ধন কাটিয়ে বেরিয়ে আসতে পারে না। আইনষ্টাইনের তত্ত্ব থেকে 'সূচনা-কম্পাংকের' (Threshold Frequency) অস্তিত্বের একটা সহজ ব্যাখ্যা এই ভাবে পাওয়া যায়।

এখানে উল্লেখযোগ্য যে (4.3) সমীকরণের সাহায্যে প্ল্যাংক ধ্রুবকের মান সঠিক ভাবে নিরূপণ করা সম্ভব। উক্ত সমীকরণ থেকে পাওয়া যায়

$$V_0 = \left(\frac{h}{e}\right) \nu - \left(\frac{\epsilon_0}{e}\right) \qquad (4.3a)$$

আপতিত আলোকের কম্পাংক পরিবর্তনের সংগে নিরোধ বিভব $V_0$ পরিবর্তনের যদি একটি লেখচিত্র আঁকা যায়, তাহলে (4.5) চিত্রের অনুরূপ একটি সরলরেখা পাওয়া যায়। এই সরলরেখার নতি (Slope) হচ্ছে $(h/e)$ সংখ্যাটির সমান। (4.4) অনুচ্ছেদে বর্ণিত পরীক্ষা অনুষ্ঠিত করে

মিলিকান এই ভাবে $(h/e)$ নিরূপণ করেন। যেহেতু ইলেকট্রন আধান $e$ জানা আছে, অতএব এই পরিমাপ থেকে $h$ পাওয়া সম্ভব। মিলিকান তাঁর নিজের পরিমিত $e$ এর মান বসিয়ে (2.6 অনুচ্ছেদ দ্রষ্টব্য) পান $h = 6 \cdot 55 \times 10^{-27}$ আর্গ-সেকেণ্ড। বর্তমানে প্ল্যাংক ধ্রুবকের সার্বিক ভাবে গৃহীত মান হচ্ছে

$$h = 6 \cdot 625 \times 10^{-27} \text{ আর্গ-সেকেণ্ড}$$

আইনষ্টাইনের আলোক-কোয়ানটাম মতবাদের সাহায্যে আলোক-তাড়িত ক্রিয়ার যে সঠিক ব্যাখ্যা করা সম্ভব, এর থেকে আলোকের 'কণিকা-প্রকৃতির' বাস্তবতা সম্বন্ধে কোন সন্দেহের অবকাশ থাকে না।

### 4.7: আলোক-তাড়িত সমীকরণ প্রয়োগের উদাহরণ

আইনস্টাইনের আলোক-তাড়িত সমীকরণের প্রয়োগ একটি সহজ উদাহরণ দ্বারা দেখান যেতে পারেঃ

মনে করা যাক যে 4500 অ্যাংস্ট্রম তরঙ্গদৈর্ঘ্য সম্পন্ন আলোক এক টুকরা সোডিয়ামের উপর আপতিত করা হয়। এই আলোকের শক্তি এবং কম্পাংক কত? যদি সোডিয়ামের নিষ্পাদনীয় কার্য হয় $\varepsilon_0 = 2 \cdot 3$ ভোল্ট তাহলে সোডিয়াম থেকে নির্গত ফোটো ইলেকট্রনের বৃহত্তম গতিশক্তি কত হবে? নিরোধ বিভবই বা কত হবে?

আমরা জানি যে ফোটনের শক্তি হচ্ছে

$$E = h\nu = \frac{hc}{\lambda} = \frac{6 \cdot 625 \times 10^{-27} \times 3 \times 10^{10}}{1 \cdot 6 \times 10^{-12} \times \lambda\,(\text{অ্যাং}) \times 10^{-8}} \text{ ইলেকট্রন-ভোল্ট}$$

$$= \frac{12412 \cdot 5}{\lambda\,(\text{অ্যাং})} \text{ ই-ভো*} \tag{4.4}$$

*বিঃ দ্রঃ—কোন আলোকের তরঙ্গদৈর্ঘ্য জানা থাকলে, তার শক্তি নির্ণয়ের জন্য উপরে প্রদত্ত (4.4) অভিব্যক্তিটি সব সময়েই প্রযোজ্য। সহজে মনে রাখবার জন্য অনেক সময় নিম্নলিখিত আসন্ন (Approximate) অভিব্যক্তিটি ব্যবহার করা যায়ঃ

$$E = \frac{12345}{\lambda\,(\text{অ্যাং})} \text{ ই-ভো} \tag{4.4a}$$

এই অভিব্যক্তির সাহায্যে ফোটনের শক্তি প্রতিপন্ন করলে যে ত্রুটি থেকে যায় তার মান 0.6% অপেক্ষা কম হয়।

এক্ষেত্রে $\lambda = 4500$ অ্যাং; অতএব ফোটনের শক্তি হচ্ছে

$$E = \frac{12412{\cdot}5}{4500} = 2{\cdot}76 \text{ ই-ভো}$$

কম্পাংক হচ্ছে $\nu = \frac{c}{\lambda} = \frac{3 \times 10^{10}}{4500 \times 10^{-8}} = 6{\cdot}67 \times 10^{14}$ প্রতি সেকেণ্ডে। নিঃসৃত ফোটো ইলেকট্রনের উচ্চতম গতিশক্তি হবে

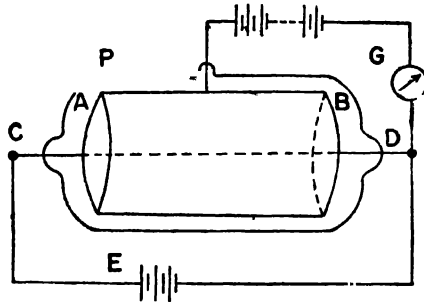
$$E_m = E - \varepsilon_0 = 2{\cdot}76 - 2{\cdot}3 = 0{\cdot}46 \text{ ই-ভো}$$

যেহেতু $E_m = eV_0$, অতএব নিরোধ-বিভব হবে

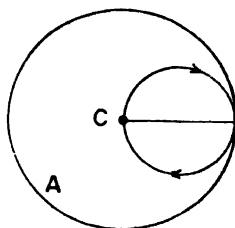
$$V_0 = \quad = \frac{0{\cdot}46 \text{ ই-ভো}}{\text{ইলেকট্রন-আধান}} = 0{\cdot}46 \text{ ভোল্ট}$$

## 4. 8: উত্তাপের ফলে ইলেকট্রন নিঃসরণ

প্রায় দুইশত বৎসর কাল ধরে জানা আছে যে খুব উত্তপ্ত ধাতুর সংলগ্ন বাতাস ও অন্য যে কোন গ্যাস তড়িৎ পরিবাহক হয়। গত শতাব্দীর শেষের দিকে এলষ্টার ও গাইটেল (Elster and Geitel) দেখান যে কোন ধাতুকে উত্তাপ প্রয়োগ দ্বারা শ্বেতাভ করে তুললে ধাতুটি ঋণাত্মক আধান হারায়। এই প্রক্রিয়া বেশী প্রকট হয় যদি ধাতুটিকে গোড়ায় ঋণাত্মক আধানে আহিত করা যায়। রিচার্ডসন (O. W. Richardson) নামক ব্রিটিশ বিজ্ঞানী এই বিষয়ে নানাবিধ পরীক্ষা অনুষ্ঠিত করেন। তিনি দেখান যে উত্তপ্ত শ্বেতাভ ধাতুর ঋণাত্মক আধান হারানর কারণ হচ্ছে তাদের দেহ থেকে ঋণাত্মক আধানবাহী কণিকার নির্গমন। নির্গত কণিকাগুলির আপেক্ষিক আধান ($e/m$) নিম্নে বর্ণিত পরীক্ষার সাহায্যে পরিমাপ করা যেতে পারে।

(4.6) চিত্রে P একটি পাত্রের মধ্যে CD একটি বিশুদ্ধ ধাতু নির্মিত সরু

চিত্র 4.6
থার্মায়ন কণিকার $e/m$ পরিমাপ ব্যবস্থা।

তার বা তন্তু (Filament) যাকে ঘিরে একটি ধাতব চোঙ AB রাখা থাকে। তন্তুটিকে চোঙের অক্ষ বরাবর টান করে ধরে রাখা হয়। P পাত্রের মধ্যের বায়ুর চাপ খুব নিম্নমানে রাখা হয়।

তন্তুটিকে E ব্যাটারির সাহায্যে বাইরে থেকে তড়িৎপ্রবাহ পাঠিয়ে উত্তপ্ত করা হয়। তন্তু এবং চোঙের মধ্যে বিভব প্রভেদ প্রয়োগ করারও ব্যবস্থা থাকে। G একটি তড়িৎপ্রবাহ মাপক যন্ত্র। তন্তুটিকে খুব উত্তপ্ত করে যদি AB চোঙের সাপেক্ষে ঋণাত্মক বিভবে রাখা যায়, তাহলে G মাপক যন্ত্র তড়িৎপ্রবাহ নির্দেশ করে। কিন্তু তন্তুটিকে চোঙের সাপেক্ষে ধনাত্মক করলে কোন প্রবাহ দেখা যায় না। এর থেকে প্রমাণিত হয় যে উত্তপ্ত ধাতু থেকে ঋণাত্মক আধানবাহী কণিকা নির্গত হয়। (4.7) চিত্রে

চিত্র 4.7
(4.6) চিত্রে প্রদর্শিত পরীক্ষা
ব্যবস্থার প্রস্থচ্ছেদ চিত্র।

AB চোঙটির প্রস্থচ্ছেদ A বৃত্ত দ্বারা প্রদর্শিত হয়েছে। আর CD তন্তুটির প্রস্থচ্ছেদ বৃত্তের কেন্দ্রে অবস্থিত C বিন্দু দ্বারা নির্দেশিত হয়েছে। C এবং A এর মধ্যে বিভব প্রভেদ প্রয়োগের ফলে একটি কৈন্দ্রিক (Radial) তড়িৎক্ষেত্রের সৃষ্টি হয়। উত্তপ্ত তন্তু থেকে নির্গত ঋণাত্মক আহিত কণিকাগুলি এই কৈন্দ্রিক তড়িৎক্ষেত্রের জন্য চোঙের দিকে আকৃষ্ট হয়ে বিভিন্ন ব্যাসার্ধ বরাবর অগ্রসর হয় এবং চোঙের উপর আপতিত হয়ে তড়িৎপ্রবাহের সৃষ্টি করে। এখন যদি চিত্রতলের অভিলম্বে (অর্থাৎ CD তন্তুর সমান্তরালে) একটি চৌম্বকক্ষেত্র প্রয়োগ করা হয়, তাহলে আহিত কণিকাগুলির ভ্রমণপথ আর সরলরেখা থাকে না, বক্র হয়ে যায়। যদি CD তন্তুর ব্যাস AB চোঙের ব্যাসের তুলনায় খুব ছোট হয়, তাহলে উক্ত ভ্রমণ পথ প্রায় বৃত্তাকার হয়। কারণ এক্ষেত্রে নিঃসৃত ইলেকট্রনগুলি তন্তু থেকে অল্প দূরত্বের মধ্যেই প্রায় উচ্চতম সম্ভাব্য বেগ অর্জন করে। চৌম্বকক্ষেত্র

$H$ ক্রমশঃ বাড়াতে থাকলে উক্ত বৃত্তাকার পথের ব্যাস $d$ কমতে থাকে। অবশেষে যখন এই ব্যাস চোঙটির ব্যাসার্ধ $R$ অপেক্ষা কম হতে আরম্ভ করে তখন নির্গত কণিকাগুলি আর চোঙ পর্যন্ত পৌঁছতে পারে না এবং G মাপক যন্ত্রে নির্দেশিত তড়িৎপ্রবাহ সহসা স্তব্ধ হয়ে যায়। মনে করা যাক চৌম্বকক্ষেত্রের যে সংকট-মানে তড়িৎপ্রবাহ বন্ধ হয়ে যায় তা হচ্ছে $H_0$। স্পষ্টতঃ এই অবস্থায় $d = R$ হয়। আবার নির্গত কণিকাগুলির আধান ও ভর যদি যথাক্রমে $e$ এবং $m$ হয় এবং তড়িৎক্ষেত্রের প্রভাবে তাদের অর্জিত বেগ হয় $v$, তাহলে লেখা যায়

$$\tfrac{1}{2} mv^2 = eV$$

এখানে $V$ হচ্ছে তন্তু এবং চোঙের মধ্যেকার বিভব প্রভেদ।

অতএব $\quad v = \sqrt{(2eV/m)}$

আবার চৌম্বকক্ষেত্রের জন্য প্রযুক্ত বল হচ্ছে

$$\frac{Hev}{c} = \frac{mv^2}{(d/2)}$$

অতএব $\quad d = \dfrac{2mvc}{He} = \dfrac{2mc}{He}\sqrt{\dfrac{2eV}{m}} = \sqrt{\dfrac{8mVc^2}{H^2e}} = R$

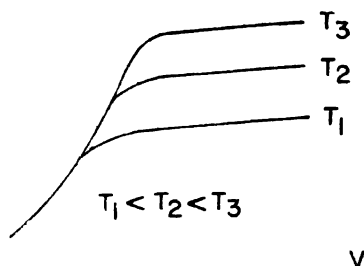
এর থেকে পাওয়া যায় $e/mc = \dfrac{8Vc}{H^2R^2}$ (4.5)

(4.5) সমীকরণে $e$ ও $V$ স্থিরতড়িৎ এককে ($e.s.u.$) এবং $H$ তড়িৎ-চুম্বকীয় এককে ($e.m.u.$) পরিমিত হয়।

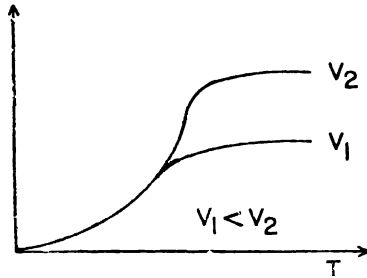
পরিমাপ করে দেখা যায় তাপ প্রয়োগের ফলে ধাতু দেহ থেকে নির্গত কণিকাগুলির $e/m$ ইলেকট্রনের $e/m$ থেকে অভিন্ন। অর্থাৎ নির্গত কণিকাগুলি হচ্ছে ইলেকট্রন। তাপ প্রয়োগের ফলে ধাতু থেকে ইলেকট্রন নিঃসরণ প্রক্রিয়াকে বলা হয় 'তাপীয় ইলেকট্রন বা তাপায়ন নিঃসরণ' (Thermionic Emission) এবং নিঃসৃত ইলেকট্রনগুলিকে বলা হয় 'তাপায়ন' (Thermion) বা 'তাপীয় ইলেকট্রন'।

### 4. 9 : তাপায়ন নিঃসরণের উপর উষ্ণতার প্রভাব

উষ্ণতা পরিবর্তনের সংগে তাপায়ন নিঃসরণের পরিবর্তন উপরে বর্ণিত এবং (4.6) চিত্রে প্রদর্শিত পরীক্ষা ব্যবস্থার অনুরূপ একটি ব্যবস্থা অবলম্বন করে পরিমাপ করা যায়। এক্ষেত্রে চৌম্বকক্ষেত্র অবশ্য বাদ দিতে

হবে। CD তন্তুটি খুব বিশুদ্ধ ধাতু দ্বারা তৈয়ারী হওয়া প্রয়োজন। প্রথমে তারটিকে প্রায় এক সপ্তাহ ধরে তড়িৎপ্রবাহের সাহায্যে উত্তপ্ত করে দীপ্তিমান করে রাখা হয়, যাতে এর মধ্যেকার স্বল্পতম অপদ্রব্যগুলিও উত্তাপের ফলে বিদূরিত হয়ে যায়। P পাত্রটিকে বরাবর খুব নিম্নচাপে রাখতে হয়। এরপর তন্তুটির মধ্য দিয়ে একটি নির্দিষ্ট তড়িৎপ্রবাহ পাঠিয়ে তন্তু এবং চোঙের মধ্যেকার বিভব প্রভেদ পরিবর্তন করে G মাপক যন্ত্রের সাহায্যে তাপায়ন প্রবাহের পরিবর্তন মাপা হয়। অ্যানোডের ধনাত্মক বিভব বাড়াতে থাকলে ক্রমশঃ বেশী সংখ্যক তাপীয় ইলেকট্রন এর উপরে আপতিত হতে থাকে এবং তাপায়ন প্রবাহ বৃদ্ধি পায়। অবশেষে বিভব যথেষ্ট উচ্চ হলে, ক্যাথোড তন্তু থেকে নির্গত সব ইলেকট্রনগুলিকেই অ্যানোড টেনে নেয়, যার ফলে তাপায়ন প্রবাহ সম্পৃক্ত হয়। (4.8) চিত্রে বিভব প্রভেদের সংগে প্রবাহের এই পরিবর্তন লেখচিত্রাকারে দেখান হয়েছে।

চিত্র 4.8
বিভিন্ন উষ্ণতায় বিভব প্রভেদের সংগে তাপায়ন প্রবাহ পরিবর্তনের লেখচিত্র।

উত্তপ্ত তন্তুটির মধ্যে তড়িৎপ্রবাহ যতক্ষণ অপরিবর্তিত থাকে এর উষ্ণতাও ততক্ষণ অপরিবর্তিত থাকে। তন্তুর মধ্য দিয়ে প্রবাহমান তড়িৎপ্রবাহ এবং এর দুই প্রান্তের মধ্যেকার বিভব প্রভেদ পরিমাপ করে নির্দিষ্ট উষ্ণতায় CD তন্তুর রোধ নিরূপণ করা যায়। এই রোধ যদি $0°$ সে উষ্ণতায় জানা থাকে, তাহলে রোধের উষ্ণতা গুণাংক থেকে তন্তুটির উষ্ণতা $(t)$ নিরূপণ করা যায়। তাছাড়া অপটিক্যাল পাইরোমিটার প্রভৃতি যন্ত্রের সাহায্যে আরও সঠিকভবে তন্তুটির উষ্ণতা পরিমাপ করা যায়। অনেক-ক্ষেত্রে ষ্টেফান-বোলৎসমান (Stefan-Boltzmann) বিকিরণ ফর্মুলা

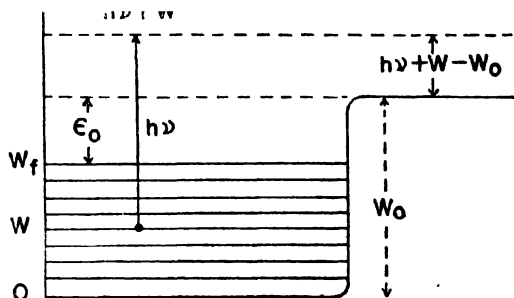
ব্যবহার করেও উষ্ণতা পরিমাপ করা হয়। এইভাবে একটি নির্দিষ্ট উষ্ণতায় সম্পৃক্ত তাপায়ন প্রবাহ ($i_s$) মাপা হয়। এখন যদি উত্তপ্তকারী প্রবাহ ($I_f$) বাড়ান যায়, তাহলে তন্তুটির উষ্ণতাও বৃদ্ধি পায়। পূর্বোক্ত পদ্ধতিতে এই বর্ধিত উষ্ণতায় সম্পৃক্ত তাপায়ন প্রবাহ আবার মাপা হয়। এই ভাবে উষ্ণতার সংগে তাপায়ন প্রবাহ পরিবর্তন পরিমাপ করা হয়। এই পরিবর্তনের প্রকৃতি (4.9) চিত্রে লেখচিত্রাকারে প্রদর্শিত হয়েছে।

চিত্র 4.9

উষ্ণতার সংগে সম্পৃক্ত তাপায়ন প্রবাহ পরিবর্তনের লেখচিত্র। $V_1$ এবং $V_2$ হচ্ছে বিভিন্ন ক্ষেত্রে অ্যানোড ও ক্যাথোডের মধ্যে প্রযুক্ত বিভব প্রভেদ।

### 4. 10 : তাপায়ন নিষ্পাদনীয় কার্য

আলোক-তাড়িত নিঃসরণ বিষয়ে আলোচনার সময় নিষ্পাদনীয় কার্য (Work Function) সম্বন্ধে উল্লেখ করা হয়েছে। কোন পদার্থের উপরিতল থেকে ইলেকট্রন নিঃসৃত করতে ন্যূনতম প্রয়োজনীয় শক্তিকে বলা হয় 'নিষ্পাদনীয় কার্য'। একটি $e$ আধান সম্পন্ন ইলেকট্রনকে উক্ত পরিমাণ শক্তি ($\varepsilon_0$) অর্জন করতে যদি $\phi$ বিভব প্রভেদের ভিতর দিয়ে যেতে হয়, তাহলে লেখা যায় $\varepsilon_0 = e\phi$; বিভব $\phi$ সাধারণতঃ ভোল্টে মাপা হয় এবং নিষ্পাদনীয় কার্য $\varepsilon_0$ সাধারণত ইলেকট্রন-ভোল্ট এককে প্রকাশিত হয়। অনেক সময় $\phi$ সংখ্যাটিকেও নিষ্পাদনীয় কার্য বলা হয়। ধাতব পদার্থ থেকে নিঃসৃত হতে ইলেকট্রনগুলির কেন একটা ন্যূনতম শক্তির প্রয়োজন হয়, তা বুঝতে হলে ধাতুর মধ্যে ইলেকট্রনগুলি কীভাবে বিচরণ করে তা জানা প্রয়োজন।

আমরা জানি যে ধাতুর তড়িৎ পরিবাহিতা খুব বেশী। স্বল্পতম বিভব প্রয়োগ করলেই ধাতুর মধ্যে তড়িৎপ্রবাহের সৃষ্টি হয়। এর কারণ ব্যাখ্যা করার জন্য অনুমান করা হয় যে ধাতুদেহের মধ্যে বহুল পরিমাণে মুক্ত ইলেকট্রন থাকে, যাদের বলা হয় পরিবাহী ইলেকট্রন (Conduction Electron)। এরা ধাতু দেহের দৃঢ় সংবদ্ধ পরমাণুগুলির মধ্য দিয়ে একস্থান থেকে অন্যস্থানে স্বচ্ছন্দে বিচরণ করতে পারে (10·2 অনুচ্ছেদ দ্রষ্টব্য)। কিন্তু ধাতু থেকে বেরিয়ে আসতে পারে না। কারণ ধাতু দেহ থেকে ইলেকট্রনগুলির উপর একটা আকর্ষণী বল ক্রিয়া করে। এই বলকে বলা হয় 'প্রতিবিম্ব বল' (Image Force)। স্থিরতড়িৎ প্রতিবিম্ব তত্ত্ব (Electrostatic Image Theory) অনুযায়ী যখন একটি বিন্দু সদৃশ আধান কোন ধাতব সমতলের সামনে অবস্থিত থাকে তখন ধাতুতলের বিপরীত দিকে সমান দূরত্বে একটি সমমান সম্পন্ন বিপরীত আধান আবিষ্ট হয় বলে কল্পনা করা যায়। ধাতুতল এবং আদি আধানটির মধ্যের আকর্ষণী বল এই কল্পিত প্রতিবিম্ব আধান এবং আদি আধানটির মধ্যের আকর্ষণী বলের সমান হয়।

ধাতুর আকর্ষণী বলের জন্য ইলেকট্রনগুলি একটা বিভব-কূপের (Potential Well) মধ্যে অবস্থান করে। কারণ ধাতুর মধ্যে আবদ্ধ অবস্থায় ইলেকট্রনের স্থিতিশক্তি ঋণাত্মক হয়, আর সদ্যমুক্ত অবস্থায় এই স্থিতিশক্তির মান হয় শূন্য। প্রকৃতপক্ষে বিভব-কূপের উৎপত্তির জন্য শুধু উপরোক্ত প্রতিবিম্ব বলই দায়ী নয়। কেবল প্রতিবিম্ব বল বিবেচনা করে সম্পূর্ণ মসৃণ কোন ধাতুতল থেকে একটি ইলেকট্রন নিঃসৃত হবার জন্য প্রয়োজনীয় শক্তি নির্ণয় করলে দেখা যায় যে উক্ত শক্তির মান অসীম হয়। অপরপক্ষে যদি অনুমান করা হয় যে কোন ধাতুতলই সম্পূর্ণ মসৃণ নয়, তাহলে ধাতুতলের খুব সন্নিকটে, অর্থাৎ পরমাণবিক ব্যাসার্ধের সমমাত্রিক দূরত্বে, ইলেকট্রনের উপরে ক্রিয়াশীল বলের প্রকৃতি ভিন্নরূপ হয়। এই বল ধাতুতল থেকে খুব অল্পদূরে পর্যন্ত ক্রিয়াশীল হয়। অধিকতর দূরত্বে উপরোক্ত প্রতিবিম্ব বল ক্রিয়াশীল হয়। এই দুই প্রকার বল বিবেচনা করে যদি ধাতুতল থেকে পরিমিত দূরত্বের সংগে ইলেকট্রনের স্থিতিশক্তি পরিবর্তনের লেখচিত্র আঁকা যায়, তাহলে লেখচিত্রটি কূপের (Well) আকৃতি সম্পন্ন হয়। (4.10) চিত্রে এই বিভব-কূপ (Potential Well) দেখান হয়েছে। যদি মনে করা যায় যে চরম শূন্য উষ্ণতায় সমস্ত ইলেকট্রনগুলি এই বিভব-কূপের তলদেশে অবস্থান করে (যা পদার্থবিদ্যার সনাতন সূত্রানুযায়ী সম্ভবপর), তাহলে ধাতু থেকে নিঃসৃত হতে হলে,

চিত্র 4.10
বিভব কূপের চিত্ররূপ।

অর্থাৎ শূন্য বিভবতলে উঠে আসতে হলে, তাদের একটা ন্যূনতম শক্তির প্রয়োজন। ঠিক যেমন একটি গভীর কূপের তলদেশ থেকে কোন বস্তুকে যদি অভিকর্ষের প্রভাব কাটিয়ে উপরে উঠিয়ে আনতে হয়, তাহলে তাকে কিছুটা প্রাথমিক শক্তি সরবরাহ করার প্রয়োজন হয়। আধুনিক কোয়ানটাম বলবিদ্যা অনুযায়ী অবশ্য ধাতু মধ্যস্থ সংযোজী (Valence) ইলেকট্রনের সবগুলিই বিভব-কূপের তলদেশে থাকতে পারে না। উক্ত তলদেশ থেকে শুরু করে উপর দিকে বিভিন্ন অবচ্ছিন্ন (Discrete) কতকগুলি শক্তিস্তরে ইলেকট্রনগুলি অবস্থান করে। এর কারণ হচ্ছে (5.4) অনুচ্ছেদে আলোচিত পাউলির অপবর্জন মতবাদ (Pauli's Exclusion Principle)। এই মতবাদ অনুযায়ী নির্দিষ্ট কোয়ানটাম সংখ্যা সমূহ দ্বারা নির্ধারিত কোন শক্তিস্তরে একাধিক ইলেকট্রন অবস্থান করতে পারে না।

এই শক্তিস্তরগুলির মোট সংখ্যা ধাতুর মধ্যে মোট ইলেকট্রন সংখ্যার উপর নির্ভরশীল। ধাতুর কোয়ানটাম তত্ত্ব অনুযায়ী চরমশূন্য উষ্ণতায় ইলেকট্রনগুলি সেই সব শক্তিস্তরে অবস্থান করে যাদের শক্তি শূন্য থেকে একটা উচ্চতম মান $W_f$ (ফের্মি-স্তর; Fermi Level) পর্যন্ত বিস্তৃত থাকে। ধাতব ইলেকট্রনের শক্তিস্তরগুলির অবস্থান (4.10) চিত্রে দেখান হয়েছে। এই চিত্রে শূন্যশক্তি ইলেকট্রনগুলি বিভব-কূপের তলদেশে অবস্থান করে। উচ্চতর শক্তি সম্পন্ন ইলেকট্রনগুলি বিভব-কূপের তল-দেশ থেকে উপরের দিকে অবস্থিত বিভিন্ন শক্তিস্তরে অবস্থান করে। চিত্র থেকে বোঝা যায় যে ধাতুদেহ থেকে বিচ্ছিন্ন হতে হলে ইলেকট্রন-গুলিকে বিভব-কূপের উচ্চতম স্তর $W_0$ পার হয়ে আসতে হয়। অনু-ভূমিক রেখা দ্বারা নির্দেশিত এই স্তর ফের্মিস্তর $W_f$ থেকে ঊর্ধ্বে

অবস্থিত। স্পষ্টতঃ ধাতুর মধ্যে বিভিন্ন শক্তিস্তর থেকে নিঃসৃত হতে হলে ইলেকট্রনগুলির বিভিন্ন পরিমাণ শক্তির প্রয়োজন। সর্বনিম্ন শক্তিস্তরে অবস্থিত ইলেকট্রনের ক্ষেত্রে এই প্রয়োজনীয় শক্তির মান হয় $W_o$; আর সর্বোচ্চ ইলেকট্রনপূর্ণ স্তর, অর্থাৎ ফের্মিস্তর $W_f$ থেকে নিঃসৃত হতে প্রয়োজনীয় অতিরিক্ত শক্তির মান হয় $\varepsilon_o = W_o - W_f$; এই শেষোক্ত শক্তিকেই বলা হয় নিষ্পাদনীয় কার্য (Work Function)।

নিষ্পাদনীয় কার্যের উপরোক্ত সংজ্ঞা চরম শূন্য উষ্ণতায় প্রযোজ্য। উষ্ণতা বাড়লে মোট ইলেকট্রন সংখ্যার একটা স্বল্পাংশ ফের্মিস্তরের ঊর্ধ্বতর অন্যান্য ইলেকট্রনশূন্য শক্তিস্তরগুলিতে উঠে যায়। স্বাভাবিক উষ্ণতায় বেশীর ভাগ ইলেকট্রনই অবশ্য $W_f$ অপেক্ষা নিম্নতর স্তরগুলিতে অবস্থান করে। উষ্ণতা যত বাড়ান যায় $W_f$ অপেক্ষা ঊর্ধ্বতর শক্তিস্তরে ইলেকট্রন সংক্রমণের সম্ভাব্যতাও (Probability) বাড়তে থাকে। এদের মধ্যে কিছু সংখ্যক ইলেকট্রন $W_o$ বা আরও ঊর্ধ্বতর শক্তিস্তরে উঠে যেতে পারে। স্পষ্টতঃ এই ইলেকট্রনগুলি ধাতু দেহ থেকে নিঃসৃত হবে। উষ্ণতা যত বাড়ে এদের সংখ্যাও তত বাড়ে। এই ভাবে ধাতু দেহ থেকে তাপীয় ইলেকট্রন নিঃসরণের ভৌত (Physical) ব্যাখ্যা করা সম্ভব।

বিভিন্ন ধাতুর নিষ্পাদনীয় কার্যের এবং আলোক-তাড়িত সূচনা তরঙ্গ-দৈর্ঘ্যের পরিমিত মান (4.1) সারণীতে লিপিবদ্ধ করা হয়েছে। উক্ত সারণীর শেষ স্তম্ভে সূচনা তরঙ্গ দৈর্ঘ্যের লিপিবদ্ধ মানগুলি থেকে (4·4) সমীকরণের সাহায্যে নিরূপিত নিষ্পাদনীয় কার্যের মানও লিপিবদ্ধ করা হয়েছে। দ্বিতীয় স্তম্ভে প্রদত্ত নিষ্পাদনীয় কার্যের পরিমিত মান-গুলির সংগে এই ভাবে নিরূপিত মানের সংগতি লক্ষ্যণীয়।

উপরের আলোচনা থেকে আলোক-তাড়িত নিঃসরণের জন্য প্রয়োজনীয় সূচনা-কম্পাংকের (4·6 অনুচ্ছেদ দ্রষ্টব্য) অস্তিত্বের কারণও বোঝা যায়। (4.10) চিত্র থেকে দেখা যায় যে যখন কোন ধাতুর উপর $h\nu$ শক্তি বিশিষ্ট আলোক ফোটন আপতিত হয়ে ধাতুর মধ্যে $W$ শক্তিস্তরে অবস্থিত একটি ইলেকট্রন কর্তৃক শোষিত হয়, তখন ইলেকট্রনটির মোট শক্তির পরিমাণ হয় $(h\nu + W)$; যদি এই শক্তি $W_o$ অপেক্ষা বেশী হয়, তাহলে ইলেকট্রনটি নিঃসৃত হবে এবং এর গতিশক্তি হবে

$$\tfrac{1}{2}mv^2 = h\nu + W - W_0$$

যেহেতু ধাতব ইলেকট্রনের উচ্চতম শক্তি হচ্ছে $W_f$, অতএব নিঃসৃত ইলেক-ট্রনের গতিশক্তির বৃহত্তম মান হবে

$$\tfrac{1}{2}mv_m^2 = h\nu + W_f - W_0 = h\nu - \varepsilon_0$$

## সারণী 4.1

| ধাতু | নিষ্পাদনীয় কার্য (ই-ভো) | আলোক-তাড়িত সূচনা তরঙ্গ দৈর্ঘ্য (অ্যাং) | তৃতীয় স্তম্ভের রাশিমালা থেকে নিরূপিত নিষ্পাদনীয় কার্য |
|---|---|---|---|
| সিজিয়াম | 1·99 | 6560 | 1·89 |
| রুবিডিয়াম | 2·1 | 5900 | 2·1 |
| পটাসিয়াম | 2·2 | 5650 | 2·2 |
| সোডিয়াম | 2·3 | 5400 | 2·3 |
| লিথিয়াম | 2·4 | 5200 | 2·4 |
| বেরিয়াম | 2·5 | 5000 | 2·5 |
| স্ট্রন্সিয়াম | 2·7 | 4600 | 2·7 |
| ক্যাল্সিয়াম | 2·7 | 4600 | 2·7 |
| নিকেল | 4·10 | | |
| ট্যান্টালাম | 4·10 | | |
| টাংস্টেন | 4·54 | 2800 | 4·43 |
| প্ল্যাটিনাম | 5·40 | .. | |
| রুপা | 4·74 | 2650 | 4·68 |

এই সমীকরণ আইনষ্টাইনের আলোক-তাড়িত সমীকরণ (4 3) হতে অভিন্ন। স্পষ্টতঃ উক্ত সমীকরণে ব্যবহৃত $\varepsilon_0$ সংখ্যাটি এবং উপরে আলোচিত নিষ্পাদনীয় কার্য পরস্পরের সমান।

### 4. 11 : রিচার্ডসন-ডুশম্যান সমীকরণ নিরূপণঃ

উষ্ণতার সংগে নিঃসৃত তাপায়ন প্রবাহ তন ব্যাখ্যা করার জন্য ১৯০১ সালে গ্যাসের গতীয় তত্ত্বের (Kinetic Theory) ভিত্তিতে একটি তত্ত্ব উদ্ভাবিত করেন।

রিচার্ডসন কল্পনা করেন যে তাপায়ন নিঃসরণ প্রক্রিয়ার সংগে তরল পদার্থের বাষ্পায়ন (Evaporation) প্রক্রিয়ায় সাদৃশ্য আছে। বাষ্পায়নের সময় তরল পদার্থের অণুগুলি তরলের উপরিতল থেকে নির্গত হয়। এজন্য তাদের একটা ন্যূনতম গতিশক্তির প্রয়োজন, কারণ তরলের উপরিতল পার হয়ে আসার সময় অণুগুলি তরলের অন্যান্য অণুর আকর্ষণের জন্য কিছুটা বাধা পায়। তরলকে উত্তপ্ত করার ফলে তারা এই

গতিশক্তি পায়। এইরূপ ন্যূনতম গতিশক্তির প্রয়োজন হয় বলেই বাষ্পায়নের সময় তরলকে লীনতাপ (Latent Heat) সরবরাহ করতে হয়। ঠিক এই ভাবেই মনে করা যেতে পারে যে তাপায়ন নিঃসরণের সময় ইলেকট্রনগুলি যেন উত্তপ্ত ধাতুতল থেকে বাষ্পীভূত হয়ে নির্গত হয়। নির্গমনের পথে ধাতুতলে তারা পূর্ব অনুচ্ছেদে আলোচিত প্রতিবিম্ব বল জনিত বাধার সম্মুখীন হয়। এই বাধা কাটাবার জন্য তাদের একটি ন্যূনতম প্রাথমিক গতিশক্তি ($\varepsilon_0$) থাকা প্রয়োজন, যাতে তারা উক্ত বাধার বিরুদ্ধে কাজ করতে সক্ষম হয়।

রিচার্ডসনের তত্ত্বে অনুমান করা হয় যে ধাতুর মধ্যে স্বাধীন ভাবে বিচরণশীল ইলেকট্রনগুলির বেগ-বন্টন (Velocity Distribution) ম্যাকসওয়েল-বোল্‌ৎস্‌মান উদ্ভাবিত সনাতন সংখ্যায়ন (Classical Statistics) দ্বারা নির্ধারিত হয়।

পরবর্তী যুগে প্রমাণিত হয় যে রিচার্ডসনের এই অনুমান ঠিক নয়। পাউলি (Pauli), সমারফেল্‌ড (Sommerfeld) প্রমুখ বিজ্ঞানীগণ দেখান যে ধাতু মধ্যস্থ ইলেকট্রন গ্যাসের ক্ষেত্রে ফের্মি এবং ডিরাক (Fermi and Dirac) উদ্‌ভাবিত কোয়ানটাম সংখ্যায়ন (Quantum Statistics) প্রযোজ্য। (10.4) অনুচ্ছেদে এ সম্বন্ধে আলোচনা করা হবে।

ফের্মি-ডিরাক সংখ্যায়ন $T$ কেল্‌ উষ্ণতায় প্রতি একক আয়তন ইলেকট্রন গ্যাসে $W$ এবং $W+dW$ শক্তিসীমার মধ্যে অবস্থিত ইলেকট্রনের সংখ্যা হয়

$$n(W)\,dW = \frac{8\pi}{h^3}\sqrt{2m^3}\;\frac{\sqrt{w}\;dw}{e^{(w-w_f)/kT}+1} \tag{4.6}$$

এখানে $m$ হচ্ছে ইলেকট্রনের ভর, $k$ হচ্ছে বোলৎস্‌মান ধ্রুবক এবং $h$ হচ্ছে প্ল্যাংক ধ্রুবক। $W_f$ হচ্ছে (4.10) অনুচ্ছেদে আলোচিত ফের্মি-স্তরের শক্তি।

ইলেকট্রন নিঃসরণের জন্য $W > W_f$ হওয়া প্রয়োজন। বস্তুতঃ $(W - W_f)$ সংখ্যাটি কয়েক ইলেকট্রন ভোল্ট হলেই তবে ইলেকট্রন নিঃসৃত হয়। অপরপক্ষে তাপায়ন নিঃসরণের জন্য প্রয়োজনীয় উষ্ণতায় ($T \sim 2000°$ কেল্‌), $kT$ সংখ্যাটি 0.2 ই-ভো অপেক্ষা কম হয়। সুতরাং $(W - W_f) >> kT$ হয় এবং $e^{(w-w_f)/kT} >> 1$ হয়। সুতরাং (4·6) সমীকরণের লবে (Denominator) বর্তমান দ্বিতীয় পদটি উপেক্ষা করা যায়।

যদি ইলেকট্রনের বেগ হয় $v$ তাহলে যেহেতু $W = \frac{1}{2}mv^2$, সুতরাং $dW = mv\, dv$ লেখা যায়। অতএব $v$ এবং $v + dv$ বেগসীমার মধ্যে অবস্থিত ইলেকট্রনের সংখ্যা দাঁড়ায়

$$n(v)\, dv = \frac{8\pi m^3}{h^3} e^{w_f/kT}\, v^2\, e^{-mv^2/2kT}\, dv \qquad (4.7)$$

যদি ইলেকট্রনের বেগের উপাংশগুলি (Components) হয় $v_x$, $v_y$, $v_z$, তাহলে আমরা লিখতে পারি

$$4\pi v^2 dv = dv_x\, dv_y\, dv_z$$

সুতরাং $T$ কেল্‌ উষ্ণতায় যে সব ইলেকট্রনের বেগের উপাংশগুলি $v_x$ ও $v_x + dv_x$, $v_y$ ও $v_y + dv_y$ এবং $v_z$ ও $v_z + dv_z$ সীমার মধ্যে অবস্থিত থাকে. প্রতি একক আয়তনে তাদের সংখ্যা হয়

$$dn = \frac{2m^3}{h^3} e^{w_f/kT}\, e^{-m(v_x^2+v_y^2+v_z^2)/2kT}\, dv_x\, dv_y\, dv_z \qquad (4.8)$$

উত্তপ্ত ধাতুতল থেকে নিঃসৃত হবার জন্য ইলেকট্রনগুলিকে ধাতুতলের অভিলম্বে ক্রিয়াশীল আকর্ষণী বল কাটাতে হয়। যদি ধাতুতলটি $yz$ সমতলে অবস্থিত থাকে, তাহলে এই বল $x$-অক্ষ অভিমুখে ক্রিয়াশীল হয়। সুতরাং ধাতুতল থেকে নির্গত হতে হলে ইলেকট্রনের বেগের $x$-উপাংশের ন্যূনতম মান এমন হতে হবে যে ইলেকট্রনটি ধাতুতলের আকর্ষণী বল কাটিয়ে নির্গত হয়ে আসতে পারে। এই ভাবে নির্গমন সম্ভব হতে হলে $\frac{1}{2}mv_x^2 \geq \varepsilon_0$ হওয়া প্রয়োজন। অবশ্য ইলেকট্রনগুলির বেগের $y$ ও $z$ উপাংশদ্বয়ের মান $-\infty$ থেকে $+\infty$ পর্যন্ত বিস্তৃত হতে পারে। এই সব ইলেকট্রনের মধ্যে যাদের বেগের $x$-উপাংশ $v_x$ ও $v_x + dv_x$ সীমার মধ্যে থাকে তাদের সংখ্যা হয়

$$n_{v_x}\, dv_x = \frac{2m^3}{h^3} e^{w_f/kT}\, e^{-mv_x^2/2kT}\, dv_x \int_{-\infty}^{\infty} e^{-mv_y^2/2kT}\, dv_y$$
$$\times \int e^{-mv_z^2/2kT}\, dv_z$$

ডানদিকের সমাকলন (Integral) দুটির মান সুবিদিতঃ

$$\int^{\infty} e^{-mv_y^2/2kT} dv_y = \int^{\infty} e^{-mv_z^2/2kT} dv_z = \sqrt{\frac{2\pi kT}{m}}$$

অতএব $$n_{v_x} dv_x = \frac{4\pi m^2 kT}{h^3} e^{w_f/kT} e^{-mv_x^2/2kT} \qquad (4.9)$$

যেহেতু $n_{v_x} dv_x$ হচ্ছে প্রতি একক আয়তনে সেই সব ইলেকট্রনের সংখ্যা যাদের বেগের $x$-উপাংশ $v_x$ এবং $v_x + dv_x$ সীমার মধ্যে থাকে অতএব ধাতুতলের ভিতর দিয়ে প্রতি সেকেণ্ডে নির্গত ইলেকট্রনের সংখ্যা হয়ঃ

$$n = \int_{v_0} n_{v_x} \cdot v_x \, dv_x$$

উপরের সমাকলনের নিম্নসীমা $v_0$ নির্ভর করে $x$-দিকে ক্রিয়াশীল আকর্ষণী বল কাটিয়ে ধাতুতল থেকে নিঃসৃত হতে ইলেকট্রন কর্তৃক প্রয়োজনীয় ন্যূনতম শক্তি $\varepsilon_0$ সংখ্যাটির উপর; বস্তুত $\varepsilon_0 = \frac{1}{2} m v_0^2$ হয়। সুতরাং $v_0 = \sqrt{2\varepsilon_0/m}$ পাওয়া যায়।

সুতরাং সমাকলন করে আমরা পাই

$$n = \frac{4\pi m^2 kT}{h^3} e^{w_f/kT} \int_{v_0}^{\infty} v_x e^{-mv_x^2/2kT} dv_x$$

$$= \frac{4\pi m (kT)^2}{h^3} e^{(w_f - w_0)/kT} \qquad (4.10)$$

যদি প্রতিটি ইলেকট্রনের আধান হয় $e$, তাহলে নিঃসৃত তাপায়ন প্রবাহ-ঘনত্ব (Thermionic Currrent Density) হবে

$$i_s = ne = \frac{4\pi m e (kT)^2}{h^3} e^{(w_f - w_0)/kT} \qquad (4.11)$$

যদি লেখা যায় $A = 4\pi m e k^2/h^3$ এবং $\varepsilon_0 = W_0 - W_f =$ নিষ্পাদনীয় কার্য, তাহলে (4·11) সমীকরণকে লেখা যায়

$$i_s = A\, T^2 e^{-\varepsilon_0/kT} \qquad (4.12)$$

(4.11) বা (4.12) সমীকরণকে বলা হয় 'রিচার্ডসন-ডুশম্যান সমীকরণ' (Richardson-Dushman Equation)। $m$, $e$, $k$ এবং $h$ সংখ্যাগুলির মান থেকে $A$ পাওয়া যায়ঃ

$$A = 120 \text{ অ্যামপিয়ার/সেমি}^2\text{/ডিগ্রী}^2$$

এখানে উল্লেখযোগ্য যে ম্যাকস্ওয়েল-বোলৎস্মান সংখ্যায়ন প্রয়োগ করে তাপায়ন প্রবাহ সম্বন্ধে রিচার্ডসন যে সমীরণ প্রতিপন্ন করেন তা রিচার্ডসন-ডুশম্যান সমীকরণ (4.12) থেকে কিছুটা ভিন্ন ছিল। রিচার্ড-সনের এই সমীকরণটিকে লেখা যায়ঃ

$$i_s = A' T^{\frac{1}{2}} e^{-\varepsilon_0/kT} \tag{4.13}$$

এখানে $A'$ ধ্রুবকটি (4.12) সমীকরণের $A$ ধ্রুবক থেকে ভিন্ন। তাছাড়া সূচক উৎপাদকটির উষ্ণতার উপরে নির্ভরশীল গুণাংক দুটিও (যথাক্রমে $T^2$ এবং $T^{\frac{1}{2}}$ ) দুই ক্ষেত্রে পৃথক।

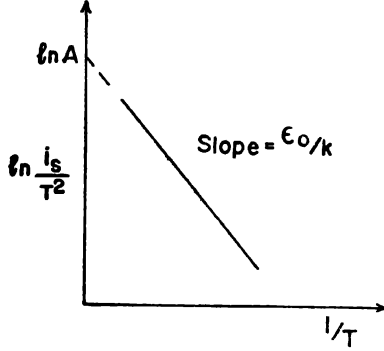
পরবর্তীযুগে তাপ-গতিবিদ্যার (Thermodynamics) যুক্তি প্রয়োগ করে রিচার্ডসন দেখান যে নিষ্পাদনীয় কার্য (Work Function) $\varepsilon_0$ ধ্রুবক হয় না; এই সংখ্যাটি উষ্ণতার উপরে নির্ভরশীল হয়। এই যুক্তি প্রয়োগ করে এবং প্রাচীন সংখ্যায়নের ভিত্তিতে তাপায়ন প্রবাহ সম্বন্ধে নূতন যে সমীকরণ প্রতিপন্ন করা হয় তা রিচার্ডসন ডুশম্যান সমীকরণ (4·12) থেকে অভিন্ন ছিল। ফের্মি-ডিরাক সংখ্যায়ন আবিষ্কারের পরে অবশ্য প্রতীয়মান হয় যে ধাতব ইলেকট্রনের ক্ষেত্রে সনাতন সংখ্যায়নের পরিবর্তে এই নব আবিষ্কৃত সংখ্যায়ন প্রয়োগ করাই তাত্ত্বিক দিক থেকে যুক্তি-সঙ্গত। সুতরাং রিচার্ডসন-ডুশম্যান সমীকরণ প্রতিপন্ন করার জন্য উপরে আলোচিত পদ্ধতিই হচ্ছে সঠিক পদ্ধতি। তাছাড়া নিষ্পাদনীয় কার্যের প্রকৃত তাৎপর্য্য ধাতুর কোয়ানটাম তত্ত্বের সাহায্যেই ঠিক ভাবে ব্যাখ্যা করা সম্ভব (4·10 অনুচ্ছেদ দ্রষ্টব্য)।

## 4. 12 : রিচার্ডসন-ডুশম্যান সমীকরণের সত্যতা যাচাই করার পরীক্ষা

ইতিপূর্বে (4.9) অনুচ্ছেদে বিভিন্ন উষ্ণতায় সম্পৃক্ত তাপায়ন প্রবাহ ($i_s$) পরিমাপ পদ্ধতি বর্ণিত হয়েছে।

সমীকরণ (4.12) থেকে পাওয়া যায়

$$\ln i_s/T^2 = \ln A - \varepsilon_0/kT.$$

পরীক্ষার দ্বারা নিরূপিত $i_s$ এবং $T$ এর মান ব্যবহার করে যদি $\ln i_s/T^2$ এবং $1/T$ সংখ্যা দুটির লেখচিত্র আঁকা যায়, তাহলে লেখচিত্রটি একটি সরলরেখা হওয়া উচিত (4.11 চিত্র দ্রষ্টব্য)। এই সরল রেখার নতি

চিত্র 4.11
$\ln i_s/T^2$ এবং $1/T$ এর লেখচিত্র।

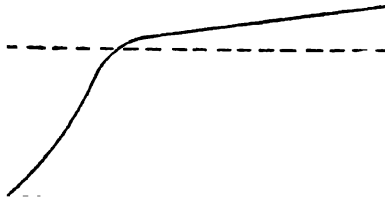
(slope) থেকে $\epsilon_0$ ধ্রুবকটির মান পাওয়া যায়। আর সরল রেখাটি যেখানে $\ln i_s/T^2$ অক্ষকে ছেদ করে সেই বিন্দুর কোটির (Ordinate) মান থেকে $A$ ধ্রুবকটি পাওয়া যায়। এখানে উল্লেখযোগ্য যে রিচার্ডসন-ডুশম্যান সমীকরণের বদলে যদি রিচার্ডসন সমীকরণ (4.13) ব্যবহার করা যায়, তাহলে $\ln i_s/T^2$ এর পরিবর্তে কোটি (Ordinate) হিসাবে $\ln i_s/\sqrt{T}$ নিতে হবে। উভয় ক্ষেত্রেই মোটামুটি সরলরেখা লেখচিত্র পাওয়া যায়; সুতরাং কোন সমীকরণটি যে সঠিক তা পরীক্ষার দ্বারা নিরূপণ করা কঠিন। তবে ধাতব পদার্থের আধুনিক কোয়ানটাম তত্ত্ব থেকে প্রতীয়মান হয় যে রিচার্ডসন-ডুশম্যান সমীকরণটিই ঠিক।

এখানে উল্লেখযোগ্য যে তারের উষ্ণতা যথেষ্ট উচ্চ না হলে তাপায়ন প্রবাহ খুব কম হয়। ব্যবহারিক প্রয়োজনের জন্য যথেষ্ট পরিমাণ প্রবাহ পেতে হলে প্ল্যাটিনাম তারের ক্ষেত্রে প্রয়োজনীয় উষ্ণতা হয় প্রায় 1400° সে, নিকেলের ক্ষেত্রে প্রায় 1000° সে এবং টাংস্টেনের ক্ষেত্রে প্রায় 2250° সে।

বেশীরভাগ ধাতুর ক্ষেত্রে $A$ সংখ্যাটির পরিমিত মান তাত্ত্বিক মানের মাত্র অর্ধেক মত পাওয়া যায়। এই অসংগতির সঠিক কারণ কী তা বলা শক্ত। তবে উষ্ণতার উপরে নিষ্পাদনীয় কার্যের নির্ভরশীলতা, ধাতুতল থেকে

নির্গমনকালে ইলেকট্রনগুলির প্রতিফলন, নিঃসারক ধাতুর কেলাসগুলির (Crystals) যদৃচ্ছ বিন্যাস প্রভৃতি কারণের জন্য এইরূপ অসংগতি দেখা যায় বলে অনুমান করা হয়।

## 4. 13 : শট্‌কি ক্রিয়া

রিচার্ডসন-ডুশম্যান সমীকরণ (4.12) অনুযায়ী সম্পৃক্ত তাপায়ন প্রবাহ ($i_s$) অ্যানোডে প্রযুক্ত ধনাত্মক বিভবের উপর নির্ভরশীল নয়। কিন্তু পরীক্ষা করে দেখা যায় যে এই উক্তি সম্পূর্ণ ঠিক নয়। অ্যানোড বিভব বাড়ালে সম্পৃক্ত প্রবাহ অল্প পরিমাণে বৃদ্ধি পায় (4.12 চিত্র দ্রষ্টব্য)।

চিত্র 4.12
শট্‌কি ক্রিয়া; বিভবের সংগে সম্পৃক্ত প্রবাহের বৃদ্ধি।

শট্‌কি (Schottky) নামক বিজ্ঞানী এই বৃদ্ধির সঠিক ব্যাখ্যা করেন। সেইজন্য ধনাত্মক অ্যানোড বিভবের সংগে সম্পৃক্ত তাপীয় ইলেকট্রন প্রবাহের উপরোক্ত বৃদ্ধিকে বলা হয় 'শট্‌কি ক্রিয়া' (Schottky Effect)।

আমরা পূর্বেই দেখেছি যে ধাতব ইলেকট্রনের উপর একটা আকর্ষণী প্রতিবিম্ব বল ক্রিয়া করে, যা ইলেকট্রন নিঃসরণের বিরুদ্ধে কাজ করে। নির্গত হতে হলে ইলেকট্রনটিকে এই বলের বাধা কাটিয়ে ধাতুতল থেকে অসীম দূরত্বে চলে আসতে হয়, যেখানে এই বলের মান শূন্য হয়ে যায়। এর জন্য ইলেকট্রনটির গোড়াতেই একটা ন্যূনতম শক্তির প্রয়োজন, যার মান হচ্ছে ধাতুটির নিষ্পাদনীয় কার্যের সমান। এখন একটি উত্তপ্ত ধাতুর খুব কাছে যদি একটি ধনাত্মক বিভবশীল অ্যানোড রাখা যায়, তাহলে এই অ্যানোড ধাতব ইলেকট্রনগুলির উপর একটা বহির্মুখী বল প্রয়োগ করে। স্পষ্টতঃ এই দুই প্রকার বিপরীত বল উত্তপ্ত ধাতুতল থেকে অল্প কিছু দূরে কোন এক বিন্দুতে পরস্পরকে বাতিল করে দেয়। কাজেই এক্ষেত্রে

একটি ধাতব ইলেকট্রন যদি কোন রকমে উপরোক্ত বিন্দু পর্যন্ত চলে আসতে পারে তাহলেই সেটি ধাতু থেকে নিঃসৃত হয়। যেহেতু এই বিন্দুটির অবস্থান পূর্বাপেক্ষা ধাতুতলের অধিকতর নিকটবর্তী, অতএব অপেক্ষাকৃত স্বল্পতর প্রাথমিক শক্তিসম্পন্ন ইলেকট্রনও এক্ষেত্রে ধাতুতল থেকে নিঃসৃত হতে পারে। অর্থাৎ এক্ষেত্রে নিষ্পাদনীয় কার্যের মান কিছুটা কমে যায়। আধুনিক কোয়ানটাম বলবিদ্যার ভাষায় প্রযুক্ত তড়িৎ-ক্ষেত্রের প্রভাবে পূর্বোল্লিখিত বিভব-কূপের উচ্চতা কমে যায়। ফলে সম্পৃক্ত তাপায়ন প্রবাহের মান বৃদ্ধি পায়। অ্যানোডের ধনাত্মক বিভব যত বাড়ান যায়, এই ক্রিয়া তত বেশী প্রকট হয়। শট্‌কির তত্ত্ব অনুযায়ী হ্রাস প্রাপ্ত নিষ্পাদনীয় কার্যের মান হয়

$$\phi = \phi_0 - \sqrt{eE}$$

এখানে $\phi_0$ হচ্ছে বাইরে থেকে প্রযুক্ত তড়িৎক্ষেত্রের অনুপস্থিতিতে নিষ্পাদনীয় কার্যের মান। যদি শেষোক্ত ক্ষেত্রে সম্পৃক্ত তাপায়ন প্রবাহের মান হয় $i_0$, তাহলে প্রযুক্ত তড়িৎক্ষেত্রের উপস্থিতিতে সম্পৃক্ত প্রবাহের মান হয়

$$i = i_0 e^{c\sqrt{E}/T}$$

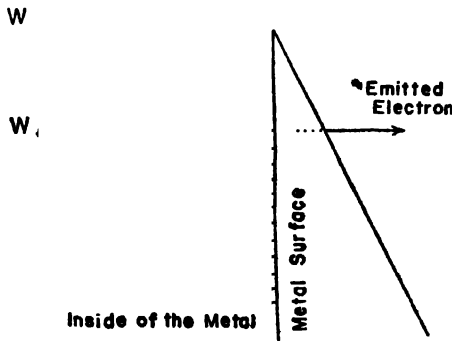
এখানে $c$ হচ্ছে একটি ধ্রুবক। উপরের সমীকরণ থেকে দেখা যায় যে প্রযুক্ত তড়িৎক্ষেত্র বাড়ালে সম্পৃক্ত তাপায়ন প্রবাহ বৃদ্ধি পায়। শট্‌কি তত্ত্ব থেকে গণনা করলে পাওয়া যায় যে প্রযুক্ত তড়িৎক্ষেত্রের মান যদি 2000 ভোল্ট/সেমি হয়, তাহলে সম্পৃক্ত প্রবাহ প্রায় শতকরা 10 ভাগ বৃদ্ধি পায়।

### 4. 14 : ক্ষেত্রজ নিঃসরণ

যখন কোন ধাতুর উপর খুব উচ্চ তড়িৎক্ষেত্র প্রয়োগ করা হয় তখন ধাতুতল থেকে ইলেকট্রন নিঃসৃত হতে দেখা যায়। এই সংঘটনকে 'ক্ষেত্রজ নিঃসরণ' (Field Emission) বলা হয়। এক্ষেত্রে ধাতুকে উত্তপ্ত করার প্রয়োজন হয় না। সেইজন্য এই জাতীয় নিঃসরণকে 'শীতল-নিঃসরণ' (Cold Emission) আখ্যাও দেওয়া হয়। প্রথমে শট্‌কি ও পরে আরও সম্পূর্ণভাবে ফাউলার ও নর্ডহাইম (Fowler and Nordheim) আধুনিক কোয়ানটাম বলবিদ্যার সাহায্যে এই সংঘটন ব্যাখ্যা করেন।

শট্‌কি ক্রিয়া আলোচনা কালে আমরা দেখেছি যে বাইরে থেকে প্রযুক্ত তড়িৎক্ষেত্রের ক্রিয়ার ফলে ধাতুর নিষ্পাদনীয় কার্য কমে যায়, অর্থাৎ

বিভব-কূপের উচ্চতা হ্রাস পায়। তড়িৎক্ষেত্র খুব প্রবল হলে, শুধু যে উচ্চতা কমে যায় তাই নয়, বিভব-কূপের বহিস্থ প্রাচীরের বেধও উপরের দিকে ক্রমশঃ কমে যায়। প্রযুক্ত তড়িৎক্ষেত্র না থাকলে বিভব-কূপটি অসীম বেধ সম্পন্ন প্রাচীর দ্বারা বেষ্টিত থাকে। তড়িৎক্ষেত্রের প্রভাবে বিভব-কূপটি একটি সীমিত বেধ সম্পন্ন বিভব প্রতিবন্ধক দ্বারা বেষ্টিত হয়। এর কারণ সহজেই প্রতীয়মান হয়। যদি একটি ঋণাত্মক নিঃসারক ধাতু-তলের সমান্তরালে অল্পদূরে একটি ধনাত্মক ধাতব তড়িৎদ্বার স্থাপিত থাকে, তাহলে এদের মধ্যে একটি সমমান তড়িৎক্ষেত্র $E$ ক্রিয়া করে। সুতরাং তড়িৎদ্বার দুটির মধ্যে যে কোন বিন্দুতে ঋণাত্মক আধানবাহী ইলেকট্রনের স্থিতিশক্তি $V(x) = -eEx + V_0$ হবে; $V_0$ হচ্ছে একটি ধ্রুবক। স্পষ্টতঃ নিঃসারক ধাতুপৃষ্ঠ থেকে যত অন্য তড়িৎদ্বারের দিকে যাওয়া যায়, ইলেকট্রনের স্থিতিশক্তি তত হ্রাস পায়। (4.13) চিত্রে এই-

চিত্র 4.13
বিভব প্রতিবন্ধকের চিত্ররূপ।

প্রকার বিভব প্রতিবন্ধক (Potential Barrier) দেখান হয়েছে। আধুনিক কোয়ানটাম বলবিদ্যা অনুযায়ী এক্ষেত্রে ইলেকট্রনগুলি বিভব প্রতিবন্ধকের উপরিতল পর্যন্ত না উঠেও উক্ত প্রতিবন্ধক প্রাচীর ভেদ করে বেরিয়ে আসতে পারে। অর্থাৎ যেন প্রাচীরের গাত্রে কতকগুলি সুড়ঙ্গপথ থাকে, যাদের ভিতর দিয়ে বেরিয়ে এসে ইলেকট্রনগুলি ধাতু দেহ থেকে নিঃসৃত হতে পারে। অনুরূপ 'সুড়ঙ্গ-ক্রিয়ার' (Tunnel Effect) ফলে তেজস্ক্রিয় পদার্থের কেন্দ্রক থেকে আল্‌ফা-কণিকার নিঃসরণ ব্যাখ্যা করা হয় (12.15 অনুচ্ছেদ দ্রষ্টব্য)।

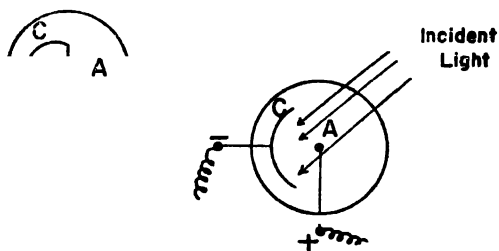
ক্ষেত্রজ নিঃসরণ যথেষ্ট পরিমাণে হতে হলে প্রযুক্ত তড়িৎক্ষেত্রের মান $10^5$ ভোল্ট/সেমি অপেক্ষা বেশী হওয়া প্রয়োজন।

## 4. 15 : তাপায়ন নিঃসরণের ব্যবহারিক প্রয়োগ

উত্তপ্ত ধাতব তন্তু থেকে ইলেকট্রন নিঃসরণ সংঘটনকে প্রয়োগ করে 'ইলেকট্রনিক ভাল্‌ভ্' (Electronic Valve) নির্মাণ করা হয়। ডায়োড, ট্রায়োড, টেট্রোড, পেন্টোড প্রভৃতি বিভিন্ন শ্রেণীর ভাল্‌ভ্ বহুল পরিমাণে ইলেকট্রনিক বর্তনীতে ব্যবহার করা হয়। রেডিয়ো, টেলিভিসন, রেডার প্রভৃতি শিল্প-বৈজ্ঞানিক (Technological) ক্ষেত্রে এই ভালভ্‌গুলির ব্যবহার এত বিস্তৃত যে 'ইলেকট্রনিক্‌স্' (Electronics) বর্তমানে একটি স্বয়ং সম্পূর্ণ স্বতন্ত্র পাঠ্য বিষয়রূপে পরিগণিত। এই বিষয়টি বর্তমান গ্রন্থের আলোচ্য বিষয় বস্তুর অন্তর্গত নয়।

## 4. 16 : আলোক-তাড়িত নিঃসরণের ব্যবহারিক প্রয়োগ; আলোক-তাড়িত কোষ

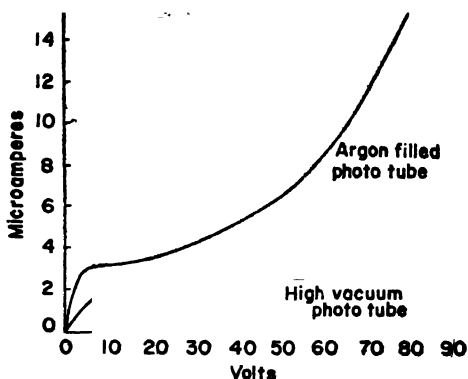
আলোক-তাড়িত ক্রিয়াকে ভিত্তি করে 'আলোক-তাড়িত কোষ' (Photo Electric Cell) নির্মাণ করা হয়। এইরূপ কোষের নানাবিধ ব্যবহারিক প্রয়োগ আছে। সাধারণতঃ এইরূপ কোষের সাহায্যে আলোকের তীব্রতা পরিমাপ করা যায়। আলোক-তাড়িত প্রবাহমাত্রা আপতিত আলোকের তীব্রতার উপর নির্ভরশীল, একথা পূর্বেই বলা হয়েছে। কাজেই এই প্রবাহ পরিমাপ করে আলোকের তীব্রতা পরিমাপ করা সম্ভব। আবার উক্ত প্রবাহের দ্বারা নানারূপ ব্যবহারিক কার্য সম্পাদন করাও সম্ভব।

সাধারণতঃ দুই প্রকার কোষ ব্যবহার করা হয়—বায়ুশূন্য কোষ এবং গ্যাস-পূর্ণ কোষ। উভয় ক্ষেত্রেই একটি আলোক সুবেদী (Light Sensitive) পদার্থ দ্বারা নির্মিত ক্যাথোড ও তার নিকটবর্তী অ্যানোড একটি কাঁচ বা স্ফটিক নির্মিত বাল্‌বের (Bulb) মধ্যে সন্নিবিষ্ট থাকে (4·14 চিত্র দ্রষ্টব্য)। বাল্‌বের গাত্রের ভিতর দিয়ে ক্যাথোড এবং অ্যানেডের সংগে বহিস্থ বর্তনীর সংযোগের ব্যবস্থা করা থাকে। বায়ুশূন্য কোষে বাল্‌বটিকে খুব নিম্ন বায়ুচাপে রেখে সীল (Seal) করে দেওয়া হয়। বাইরে থেকে আলোক সুবেদী ক্যাথোডতলের উপর আলোকপাত করা হলে নিঃসৃত ফোটো ইলেকট্রনগুলি অ্যানোডের ধনাত্মক বিভব কর্তৃক আকৃষ্ট হয়ে প্রবাহের সৃষ্টি করে। প্রবাহমাত্রা সাধারণতঃ খুব কম হয়; 100 ভোল্ট মত বিভব প্রভেদের জন্য প্রবাহমাত্রা মাত্র এক-দুই মাইক্রো অ্যাম্পিয়ার হয়।

চিত্র 4.14

আলোক তাড়িত কোষ। C হচ্ছে আলোক সুবেদী ক্যাথোড, যার উপরে আলোকপাত করলে ফোটো-ইলেকট্রন নিঃসৃত হয়। A হচ্ছে অ্যানোড।

বায়ুশূন্য কোষে নিঃসৃত আলোক-তাড়িত প্রবাহ আপতিত আলোকের তীব্রতার সংগে একঘাতে সমানুপাতিক। অর্থাৎ তীব্রতা দ্বিগুণ করলে প্রবাহমাত্রাও দ্বিগুণ হয়। বিভিন্ন বস্তু দ্বারা নির্মিত ক্যাথোড ব্যবহার করে বিভিন্ন তরঙ্গদৈর্ঘ্য সীমায় সুবেদী কোষ নির্মাণ করা যায়। সাদা আলোকের ক্ষেত্রে ক্যাথোড তলটি তৈয়ারী করা হয় প্রথমে একটি রুপার পাতের উপর সিজিয়াম ধাতু পরিন্যাস (Deposit) করে ও পরে তার উপর সিজিয়াম অক্সাইড প্রলিপ্ত করে। এইরূপ ক্যাথোডকে Cs—O—Ag এইভাবে নির্দেশ করা হয়। বর্ণালী দীপ্তিমাপক (Spectro Photometer) যন্ত্রে ব্যবহৃত কোষে সাধারণতঃ K—O—Ag ক্যাথোড ব্যবহার করা হয়।

আলোক-তাড়িত কোষের সুবেদিতা প্রায় দশগুণ বা আরও বেড়ে যায়, যদি কোষের মধ্যে স্বল্প পরিমাণে কোন উদাসী গ্যাস, যথা আর্গন, অনুপ্রবেশ করান হয়। এইরূপ কোষকে 'গ্যাস-পূর্ণ কোষ' বলা হয়। আলোক সম্পাতের ফলে ক্যাথোড তল থেকে নিঃসৃত ফোটো ইলেকট্রনগুলি অ্যানোড কর্তৃক আকৃষ্ট হয়ে শক্তি অর্জন করে এবং কোষ মধ্যস্থ গ্যাসকে সংঘাত দ্বারা আয়নিত করে। এর ফলে আলোক-তাড়িত প্রবাহ প্রভূত পরিমাণে বেড়ে যায়। এই ধরণের কোষের মধ্যে তড়িৎপ্রবাহ আলোকের তীব্রতা পরিবর্তনের সংগে কোন নির্দিষ্ট অনুপাতে পরিবর্তিত হয় না। ফলে এগুলিকে আলোকের তীব্রতা পরিমাপের কাজে লাগান যায় না।

বায়ুশূন্য এবং গ্যাস-পূর্ণ দুই প্রকার কোষের বৈশিষ্ট্য (4.15) চিত্রে প্রদর্শিত হয়েছে। স্পষ্টতঃ কোষগুলির আভ্যন্তরিক রোধ খুব উচ্চ হয়।

চিত্র 4.15

বায়ুশূন্য এবং গ্যাসপূর্ণ আলোক তাড়িত কোষের বৈশিষ্ট্য।

সেইজন্য এগুলিকে কোন কোন ক্ষেত্রে ইলেকট্রনিক ভাল্‌ভের মত পরিবর্ধকের (Amplifier) কাজে ব্যবহার করা সম্ভব। আপতিত আলোকের তীব্রতা কোন কারণে যদি পরিবর্তিত হয় তাহলে আলোক-তাড়িত প্রবাহের যে পরিবর্তন ঘটে তাকে যথোপযোগী ব্যবস্থার সাহায্যে পরিবর্ধিত করে প্রয়োজনমত নানারূপ যান্ত্রিক কার্য সম্পাদন করান সম্ভবপর। যেমন কোন কক্ষদ্বারের সামনে কেউ এসে দাঁড়ালে দরজা আপনা থেকে খুলে যেতে পারে বা একটি ঘন্টা বেজে উঠতে পারে। এছাড়া সবাক চলচ্চিত্র, টেলিভিশন প্রভৃতি ক্ষেত্রে আলোক-তাড়িত কোষ বহুল পরিমাণে ব্যবহৃত হয়।

উপরের বর্ণিত আলোক-তাড়িত কোষকে 'নিসরণ-কোষ' (Emission Cell) বলা যায়—কারণ ফোটো ইলেকট্রন নিঃসরণের উপর এদের ক্রিয়াবিধি নির্ভর করে। আর এক জাতীয় কোষ আছে যাদের মধ্যে আলোক সুবেদী ধাতু ব্যবহার না করে অর্ধ-পরিবাহী (Semi Conductor) পদার্থ ব্যবহার করা হয় যেমন সেলিনিয়াম। এই জাতীয় পদার্থ স্বাভাবিক অবস্থায় তড়িতের কুপরিবাহী। আলোকপাতের ফলে এদের পরিবাহিতা বৃদ্ধি পায়, অর্থাৎ রোধ কমে যায় (10.7 অনুচ্ছেদ দ্রষ্টব্য)। এই ক্রিয়াকে 'আভ্যন্তরিক আলোক-ক্রিয়া' (Inner Photo Effect) আখ্যা দেওয়া হয়। এই ক্রিয়াকে প্রয়োগ করে 'পরিবাহিতা কোষ' (Conductivity Cell) এবং 'আলোক-ভোল্টীয় কোষ' (Photo Voltaic Cell) নামক দুই প্রকার কোষ নির্মাণ করা হয়।

## আলোক ভোল্টীয় কোষ

এই কোষে কোন বহিস্থ ব্যাটারির প্রয়োজন হয় না। কোষটির সংগে একটি ছোট গ্যালভ্যানোমিটার সংযুক্ত থাকে; আলোকপাতের ফলে গ্যাল-ভ্যানোমিটারের কাঁটা বিচ্যুত হয়ে তড়িৎপ্রবাহ নির্দেশ করে। 'ফোটো-গ্রাফিক আলোক মাপক যন্ত্র' (Photographic Exposure Meter) প্রভৃতি বিবিধ ক্ষেত্রে এইরূপ কোষ ব্যবহার করা হয়।

একটি ধাতব প্লেটের উপরে কোন অর্ধপরিবাহী পদার্থের একটি পাতলা স্তর সৃষ্টি করে এই জাতীয় কোষ নির্মাণ করা হয়। যথা একটি তামার প্লেটের উপরে উত্তাপের সাহায্যে অর্ধপরিবাহী তামার অক্সাইডের ($Cu_2O$) একটি খুব পাতলা (10 মাইক্রন) স্তর সৃষ্টি করা যেতে পারে। স্পাটারিং প্রক্রিয়ার দ্বারাও এইরূপ অর্ধপরিবাহী স্তর সৃষ্টি করা হয়। বর্তমানে অর্ধপরিবাহী সেলিনিয়াম বা সিলিকন ব্যবহার করেই বেশীর ভাগ ক্ষেত্রে এই জাতীয় কোষ নির্মাণ করা হয়। সাধারণতঃ লোহার প্লেটের উপরে সেলিনিয়ামের স্তর গঠন করা হয়।

অর্ধপরিবাহী তামার অক্সাইড স্তরের উপরে আর একটি খুব পাতলা ধাতব স্তর (সোনা, রুপা বা প্ল্যাটিনামের) গঠন করা হয়, যার সাহায্যে বাইরের বর্তনীর সংগে ধাতব সংযোগ স্থাপন করা হয়। আলোক যখন এই ধাতব স্তর ভেদ করে অর্ধপরিবাহী স্তরের উপরে আপতিত হয়, তখন উভয় স্তরের সংলগ্ন তল থেকে আভ্যন্তরিক আলোক-তাড়িত ক্রিয়ার দ্বারা উচ্ছিন্ন ইলেকট্রনগুলি আলোকপথের বিপরীত মুখে অর্ধপরিবাহী পদার্থ থেকে ধাতব স্তরের দিকে চলে যায়। ফলে ধাতব স্তরটি ঋণাত্মক আধানে আহিত হয় এবং অর্ধপরিবাহী স্তরটি ধনাত্মক আধানে আহিত হয়। এর জন্য এদের মধ্যে একটি তড়িৎক্ষেত্রের সৃষ্টি হয়। যত বেশী ইলেকট্রন প্রবাহিত হয়, ততই এই তড়িৎক্ষেত্র বৃদ্ধি পায় এবং ইলেকট্রন প্রবাহকে বাধা দিতে থাকে। অবশেষে এই প্রবাহ বন্ধ হয়ে যায়। এই সাম্যাবস্থায় কোষের মধ্যে একটি তড়িৎচালক-বলের উদ্ভব হয়, যার মান আপতিত আলোকের তীব্রতার উপরে নির্ভর করে। অবশ্য আলোকের তীব্রতা পরিবর্তনের সংগে উৎপন্ন তড়িৎচালক-বল একঘাতে পরিবর্তিত হয় না।

অর্ধপরিবাহী স্তরের দুই দিকের ধাতব স্তর দুটির মধ্যে যদি একটি গ্যালভানোমিটার সংযুক্ত করা হয়, তাহলে বাইরের বর্তনীতে একটি তড়িৎপ্রবাহের সৃষ্টি হয়। এই তড়িৎপ্রবাহের পরিমাপ থেকে আপতিত আলোকের তীব্রতা পাওয়া যেতে পারে। অবশ্য এর জন্য কোষটিকে অন্য

উপায়ে জানা তীব্রতা সম্পন্ন আলোক দ্বারা ক্রমাংকিত (Calibrate) করা প্রয়োজন। সাধারণতঃ এইরূপ কোষ সবুজ এবং লাল আলোক সুবেদী হয়। উষ্ণতা পরিবর্তনের সংগে এদের সুবেদিতা পরিবর্তিত হয়।

সেলিনিয়াম দ্বারা নির্মিত কোষে প্রখর সূর্যালোকে প্রায় এক ভোল্ট পর্যন্ত তড়িৎচালক-বল উৎপন্ন হয়।

## পরিবাহিতা কোষ

আলোকের প্রভাবে সেলিনিয়াম প্রভৃতি অর্ধপরিবাহী পদার্থের রোধ পরিবর্তন ধর্ম ব্যবহার করে এইরূপ কোষ নির্মাণ করা হয়। এইরূপ কোষ ব্যবহারের জন্য ব্যাটারির প্রয়োজন হয়। আলোকপাতের ফলে এই কোষের মধ্যে তড়িৎপ্রবাহ বৃদ্ধি পায়, যার পরিমাণ আপতিত আলোকের তীব্রতার উপরে নির্ভরশীল। আলোকের তীব্রতা পরিমাপের কাজে এই-রূপ কোষের ব্যবহার খুবই সীমিত।

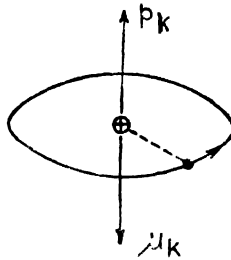
# পরিচ্ছেদ—5

# স্থান-কোয়ানটায়ন; ইলেকট্রন ঘূর্ণন; পর্যায় সারণীর ব্যাখ্যা

## 5. 1: স্থান-কোয়ানটায়ন সূত্র; স্বাভাবিক জীমান ক্রিয়া

বোর-সমারফেল্ড তত্ত্বে পরমাণুর মধ্যে ইলেকট্রনের গতি ব্যাখ্যা করতে দুই প্রকার কোয়ানটাম সংখ্যার প্রয়োজন হয়। এগুলি হচ্ছে প্রধান (Principal) কোয়ানটাম সংখ্যা ($n$) এবং কক্ষীয় (Orbital) কোয়ানটাম সংখ্যা ($k$)। কৈন্দ্রিক (Radial) কোয়ানটাম সংখ্যা ($n_r$) এই দুটি সংখ্যার অন্তরফলের সমান; কাজেই এর কোন স্বাতন্ত্র্য নেই।

(5.1) চিত্রে আবর্তনশীল ইলেকট্রনের কক্ষপথের একটি চিত্ররূপ প্রদর্শিত হয়েছে। যেহেতু ইলেকট্রনের কক্ষীয় কৌণিক ভরবেগ (Orbital Angular Momentum) একটি ভেক্টর রাশি, সেজন্য (5.1) চিত্রে উক্ত কৌণিক ভরবেগকে $p_k$ ভেক্টর দ্বারা নির্দেশিত করা হয়েছে। এই ভেক্টরটি ইলেকট্রনের আবর্তন কক্ষ তলের সংগে লম্বভাবে বিন্যস্ত থাকে।

চিত্র 5.1

ইলেকট্রনের কক্ষীয় কৌণিক ভরবেগ এবং কক্ষীয় আবর্তনজনিত চৌম্বক ভ্রামকের চিত্ররূপ।

এখন যদি একটি পরমাণুকে কোন নির্দিষ্ট দিকে ক্রিয়াশীল $H$ চৌম্বক-ক্ষেত্রে বা $E$ তড়িৎক্ষেত্রে স্থাপিত করা যায়, তাহলে ক্ষেত্রাভিমুখের সাপেক্ষে $p_k$ ভেক্টরটির দিগবিন্যাস কীরূপ হবে এই প্রশ্নের উত্তর পাওয়া যায় সমারফেল্ড উদ্ভাবিত 'স্থান কোয়ানটায়ন সূত্রের' (Space Quantization Rule) সাহায্যে।

এই সূত্র অনুযায়ী $p_k$ যদি কৌণিক ভরবেগ ভেক্টর হয়, তাহলে নির্দিষ্ট দিক অভিমুখী কোন ভেক্টর $H$ এর সাপেক্ষে $p_k$ এমন কতকগুলি দিকে বিন্যস্ত হবে যে $H$ ভেক্টরের অভিমুখে $p_k$ ভেক্টরের উপাংশের (Component) মান হবে

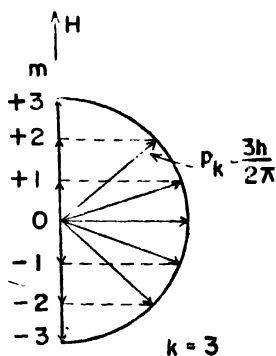
$$p_k \cos\theta = m \tag{5.1}$$

এখানে $\theta$ হচ্ছে $p_k$ এবং $H$ এর অন্তর্গত কোণ। $m$ হচ্ছে একটি পূর্ণ-সংখ্যা। একে বলা হয় 'চৌম্বক কোয়ানটাম সংখ্যা' (Magnetic Quantum Number)। $m$ এর সম্ভাব্য মান হচ্ছে

$$m = k, k-1, k-2, \ldots\ldots 0, 1, 2, \ldots\ -k \tag{5.2}$$

অর্থাৎ $m$ এর মোট $(2k+1)$ সংখ্যক মান থাকতে পারে। যেহেতু $p_k = k\,\frac{\ }{2\pi}$ অতএব (5.1) সমীকরণ থেকে পাওয়া যায়

$$\cos\theta = \frac{m}{\ } \tag{5.3}$$

অতএব সমীকরণ (5.2) অনুসারে $\theta$ কোণটিরও মোট $(2k+1)$ সংখ্যক মান থাকতে পারে। অর্থাৎ নির্দিষ্ট কোন একটি দিকের সাপেক্ষে $p_k$ ভেক্টরটি $(2k+1)$ বিভিন্ন দিকে বিন্যস্ত থাকতে পারে (5.2 চিত্র দ্রষ্টব্য)।

চিত্র 5.2
স্থান কোয়ানটায়নের চিত্ররূপ।

বোর-সমারফেল্ড তত্ত্ব অনুযায়ী বাইরে থেকে পরমাণুটির উপর যদি কোন চৌম্বকক্ষেত্র বা তড়িৎক্ষেত্র প্রয়োগ না করা হয়, তাহলে ইলেকট্রনের কক্ষপথ যে কোন তলেই অবস্থিত থাক না কেন (অর্থাৎ $p_k$ ভেক্টরটি উপরোক্ত $2k+1$ সম্ভাব্য দিক সমূহের মধ্যে যে কোন দিকেই বিন্যস্ত থাক না কেন), ইলেকট্রনটির শক্তি সব সময়ে একই হবে। এই শক্তি সমীকরণ (3·31) দ্বারা নির্ধারিত হয়। কিন্তু পরমাণুটির উপর যদি একটি চৌম্বকক্ষেত্র (বা তড়িৎক্ষেত্র) নির্দিষ্ট দিকে ক্রিয়া করে তাহলে ইলেকট্রনের মোট শক্তি প্রযুক্ত চৌম্বকক্ষেত্রের সাপেক্ষে $p_k$ ভেক্টরটির দিগ্‌বিন্যাসের উপর নির্ভর করে। অর্থাৎ পরমাণুর শক্তিস্তরের শক্তি তখন আর শুধু $n$ এবং $k$ কোয়ানটাম সংখ্যাদুটির উপরই নির্ভর করে না, চৌম্বক কোয়ানটাম সংখ্যা $m$ এর উপরও নির্ভর করে। কাজেই পরমাণুর শক্তিস্তরের শক্তি তখন $n$, $k$ এবং $m$ এই তিনটি কোয়ানটাম সংখ্যা দ্বারা নির্ধারিত হয়।

প্রযুক্ত চৌম্বকক্ষেত্রে পরমাণুর শক্তিস্তরের এই প্রকার বিভাজন (Splitting) সহজেই নির্ণয় করা যায়। যেহেতু ইলেকট্রন একটি আহিত কণিকা, এর আবর্তনের জন্য একটি তড়িৎপ্রবাহের সৃষ্টি হয়। যদি ইলেকট্রনটি নিজ কক্ষপথে প্রতি সেকেণ্ডে $\nu$ বার আবর্তিত হয় এবং $\omega$ তার কৌণিক বেগ হয়, তাহলে $\nu = \omega/2\pi$ হয়। যদি ইলেকট্রনের আধান হয় $e$, তাহলে প্রতি সেকেণ্ডে কক্ষপথের যে কোন বিন্দুর উপর দিয়ে প্রবাহিত আধানের মান $e\nu$ হয়। অর্থাৎ প্রবাহ মাত্রা হয়

$$i = e\nu = e\omega/2\pi$$

এখন ইলেকট্রনের কক্ষপথটিকে যদি $r$ ব্যাসার্ধ সম্পন্ন একটি বৃত্ত বলে কল্পনা করা হয়, তাহলে এই বৃত্তাকার তড়িৎ-বর্তনীটি একটি 'পাত চুম্বকের' (Magnetic Shell) সমতুল্য বলে মনে করা যায়। তড়িৎ-প্রবাহের চৌম্বক ক্রিয়ার তত্ত্ব থেকে জানা যায় যে এইরূপ পাত চুম্বকের চৌম্বক-ভ্রামকের (Magnetic Moment) মান হচ্ছে

$$\mu = \frac{\pi r^2 i}{c} = \frac{e w r^2}{2c}$$

উপরের সমীকরণে ইলেকট্রনীয় আধান *e.s.u.* এককে প্রকাশ করা হয়। $m_e$ ভর সম্পন্ন ইলেকট্রনটির কৌণিক ভরবেগ হচ্ছে

$$p = m_e r^2 \omega$$

অতএব $\mu$ এবং $p$ সংখ্যাদুটির অনুপাত হচ্ছে

$$\mu/p = \frac{e}{2m_e c} \tag{5.4}$$

একটি আবর্তনশীল আহিত কণিকার চৌম্বক-ভ্রামক এবং কৌণিক ভরবেগের সমীকরণ (5.4) দ্বারা নির্ধারিত অনুপাতকে বলা হয় 'ঘূর্ণ-চৌম্বক অনুপাত' (Gyro Magnetic Ratio)। প্রমাণ করা যায় যে সমীকরণ (5.4) উপবৃত্তাকার কক্ষপথের ক্ষেত্রেও প্রযোজ্য। যেহেতু ইলেকট্রনের কৌণিক ভরবেগ $p_k = k\frac{h}{2\pi}$, অতএব

$$\mu_k = \frac{e}{2m_e c}p_k = k.\ \frac{eh}{4\pi m_e c} = k\,\mu_B \tag{5.5}$$

এখানে $\mu_B = \frac{eh}{4\pi m_e c} = 9 \cdot 27 \times 10^{-21}$ আর্গ গাওস (5.6)

$\mu_B$ সংখ্যাটিকে বলা হয় বোর-ম্যাগনেটন (Bohr Magneton)। পরমাণবিক চৌম্বক-ভ্রামকের এটি হচ্ছে মৌলিক একক।

যেহেতু ইলেকট্রনের আধান ঋণাত্মক, অতএব তার আবর্তন জনিত চৌম্বক-ভ্রামক ভেক্টর ($\mu_k$) তার কৌণিক ভরবেগ ($p_k$) ভেক্টরের বিপরীতমুখী হয়। (5.1) চিত্রে এই দুটি ভেক্টরই দেখান হয়েছে।

উপরের আলোচনা থেকে দেখা যায় যে ইলেকট্রনের আবর্তনের জন্য একটি পরমাণুকে নির্দিষ্ট চৌম্বক-ভ্রামক সম্পন্ন ক্ষুদ্র চৌম্বক শলাকা বলে কল্পনা করা যায়। প্রযুক্ত চৌম্বকক্ষেত্রে একটি চৌম্বক শলাকা সাধারণতঃ ক্ষেত্রাভিমুখে বিন্যস্ত থাকে। কিন্তু এইভাবে বিন্যস্ত হবার আগে শলাকাটি ক্ষেত্রাভিমুখের দুইদিকে বারবার আন্দোলিত হতে থাকে। উপরোক্ত পরমাণবিক চুম্বকটি কিন্তু সেভাবে আন্দোলিত হয় না। এর সংশ্লিষ্ট চৌম্বক-ভ্রামক ভেক্টরটি চৌম্বকক্ষেত্রের সংগে একটি নির্দিষ্ট কোণে বিন্যস্ত থেকে উক্ত ক্ষেত্রকে অক্ষ করে অয়নচলন গতিতে (Precessional Motion) আবর্তন করতে থাকে। ঠিক যেমন একটি ঘূর্ণনশীল লাট্টুর মেরুদণ্ড যদি উল্লম্ব (Vertical) দিকের সাপেক্ষে আনত থাকে, তাহলে সেটি উল্লম্ব দিককে অক্ষ করে অয়নচলন গতিতে আবর্তিত হতে থাকে।

এই অবস্থায় $H$ চৌম্বকক্ষেত্রের মধ্যে পরমাণুর স্থিতিশক্তি হয়

$$\varepsilon_H = -\mu_k \cdot H$$

যদি $p_k$ এবং $H$ ভেক্টর দুটির অন্তর্গত কোণ $\theta$ হয়, তাহলে যেহেতু $\mu_k$ এবং $p_k$ বিপরীতমুখী হয়, অতএব আমরা পাই

$$\varepsilon_H = \mu_k H \cos\theta$$

সমীকরণ (5.3) এবং (5.5) থেকে পাওয়া যায়

$$\varepsilon_H = \mu_B k H. \frac{m}{k} = \mu_B H m \tag{5.7}$$

কাজেই চৌম্বকক্ষেত্রের মধ্যে পরমাণুর শক্তিস্তরের মোট শক্তি সমীকরণ (3.31) এবং (5.7) থেকে প্রাপ্ত শক্তিদ্বয়ের সমষ্টির সমান হয়ঃ

$$E_{nkm} = E_{nk} + \mu_B H m \tag{5.8}$$

(5.8) সমীকরণকে লেখা যায়

$$E_{nkm} = E_{nk} + \frac{eh}{4\pi m_e c} H m = E_{nk} + mh \frac{eH}{4\pi m_e c}$$
$$= E_{nk} + mh\nu_L \tag{5.9}$$

এখানে $\nu_L = eH/4\pi m_e c$ সংখ্যাটিকে বলা হয় 'লার্মর অয়ন-চলন কম্পাংক' (Larmor Precessional Frequency)।

নির্দিষ্ট $n$ এবং $k$ সম্পন্ন শক্তিস্তরগুলি এখন আর একক হয় না; এদের প্রত্যেকটি $(2m+1)$ সংখ্যক খুব কাছাকাছি অবস্থিত শক্তিস্তরে বিভাজিত হয়ে যায়। সমারফেল্ড তত্ত্ব অনুযায়ী নির্দিষ্ট $n$ এবং $k$ সম্পন্ন দুটি শক্তিস্তরের মধ্যে সংক্রমণের ফলে যে বর্ণালীরেখার সৃষ্টি হয় চৌম্বকক্ষেত্র প্রয়োগ করার জন্য সেটি কয়েকটি বিভিন্ন রেখায় বিভাজিত হয়ে যায়। চৌম্বকক্ষেত্রের প্রভাবে বিভাজিত শক্তিস্তর গুলির মধ্যে সংক্রমণ নির্ধারিত হয় নিম্নলিখিত 'নির্বাচন-সূত্র' (Selection Rule) দ্বারা

$$\Delta m = 0, \pm 1 \tag{5.10}$$

(5.3) চিত্রে $k=2$ শক্তিস্তর থেকে $k=1$ শক্তিস্তরে সংক্রমণের ফলে উৎপন্ন বর্ণালীরেখার চৌম্বকক্ষেত্র জনিত এইরূপ বিভাজন দেখান হয়েছে। নিঃসৃত বর্ণালীরেখার কম্পাংক হয়

$$\nu = \frac{\Delta E}{h} = \frac{(E_{nk} + \mu_B H m) - (E_{n'k'} + \mu_B H m')}{h}$$
$$= \frac{E_{nk} - E_{n'k'}}{h} + \frac{\mu_B H}{h}(m - m')$$

অর্থাৎ $$\nu = \nu_0 + \frac{eH}{4\pi m_e c} \cdot \Delta m \tag{5.11}$$

এখানে $\nu_0 = (E_{nk} - E_{n'k'})/h$ হচ্ছে বর্ণালীরেখাটির আদি কম্পাংক, অর্থাৎ চৌম্বকক্ষেত্র প্রয়োগের পূর্বের কম্পাংক। যেহেতু $\Delta m = 0, \pm 1$ হয়, অতএব আদি বর্ণালীরেখাটি তিনটি রেখায় বিভাজিত হয়ে যায়। বিভাজিত রেখাগুলির কম্পাংক হচ্ছে

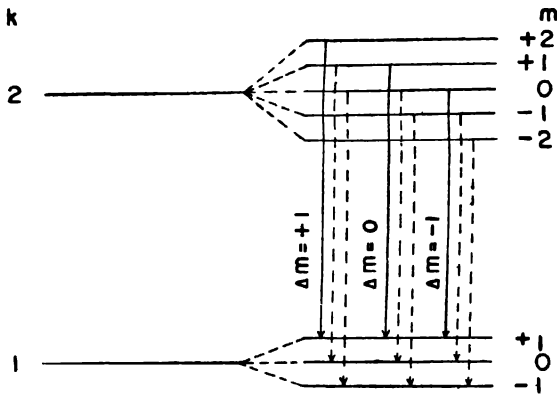
$$\nu_1 = \nu_0 \qquad (\Delta m = 0)$$

$$\nu_2 = \nu_0 + \frac{eH}{4\pi m_e c} \quad (\Delta m = +1)$$

$$\nu_3 = \nu_0 - \frac{eH}{4\pi m_e c} \quad (\Delta m = -1)$$

এর মধ্যে প্রথমটির কম্পাংক হচ্ছে আদি রেখার কম্পাংকের সমান; অন্য দুটি রেখা আদি রেখার দুই পাশে সমান কম্পাংক ব্যবধানে অবস্থিত থাকে। এই কম্পাংক ব্যবধান হচ্ছে

$$\Delta \nu = \pm \frac{eH}{4\pi m_e c} = \pm \nu_L \tag{5.12}$$

(5.3) চিত্র থেকে মনে হতে পারে যে আদি বর্ণালীরেখাটি সবশুদ্ধ নয়টি রেখায় বিভাজিত হয়ে যায়। প্রকৃতপক্ষে কিন্তু তা হয় না। চিত্র

চিত্র 5.3

স্বাভাবিক জীমান ক্রিয়া উৎপন্নকারী সংক্রমণ সমূহ। $k = 2$ এবং $k = 1$ শক্তিস্তর দুটির চৌম্বকক্ষেত্র জনিত বিভাজন চিত্রের ডানদিকে বহুগুণে বর্ধিত মাত্রায় দেখান হয়েছে।

থেকে সহজেই প্রতীয়মান হয় যে চৌম্বক কোয়ানটাম সংখ্যার নির্দিষ্ট পরিবর্তনের ফলে যতগুলি রেখা সৃষ্ট হয় সেগুলির কম্পাংক সমান হয়। উদাহরণস্বরূপ $\Delta m = +1$ সংক্রমণটি বিবেচনা করা যাক। $m' = 2$ থেকে $m = 1$, $m' = 1$ থেকে $m = 0$ এবং $m' = 0$ থেকে $m = -1$, এই তিনটি রেখার উৎপত্তি হয় এইরূপ সংক্রমণের ফলে। কিন্তু এই তিনটিরই কম্পাংক সমান হয়। কাজেই প্রকৃতপক্ষে এইরূপ সংক্রমণের জন্য একটি মাত্র রেখা পাওয়া যায়। অনুরূপে $\Delta m = 0$ এবং $\Delta m = -1$ সংক্রমণদ্বয়ের ক্ষেত্রেও একটি করে রেখা পাওয়া যায়। এর কারণ হচ্ছে যে উপরের এবং নীচের সন্নিহিত (Adjacent) শক্তিস্তরগুলির পারস্পরিক বিভাজনের (Splitting) পরিমাণ সমান হয়।

চৌম্বকক্ষেত্রের প্রভাবে পরমাণু কর্তৃক নিঃসৃত বর্ণালীরেখার বিভাজন সর্বপ্রথম লক্ষ্য করেন জীমান (Zeeman) নামক বিজ্ঞানী। সেইজন্য এই সংঘটনকে বলা হয় 'জীমান ক্রিয়া' (Zeeman Effect)। সনাতন তড়িৎ-চুম্বকীয় তত্ত্বের সাহায্যে এই ক্রিয়ার একটা ব্যাখ্যা করা সম্ভব। উক্ত তত্ত্ব থেকে প্রাপ্ত কম্পাংক ব্যবধান (5.12) সমীকরণ দ্বারা নির্ধারিত ব্যবধানের সংগে সঠিকভাবে মিলে যায়। সনাতন তড়িৎচুম্বকীয় তত্ত্ব এবং বোর-সমারফেল্ড উদ্ভাবিত পুরাতন কোয়ানটাম তত্ত্ব, উভয় তত্ত্ব থেকেই দেখা যায় যে আদি বর্ণালীরেখাটি চৌম্বকক্ষেত্রের প্রভাবে তিনটি রেখায় বিভাজিত হয়। এইরূপ বিভাজনকে বলা হয় 'স্বাভাবিক জীমান ক্রিয়া' (Normal Zeeman Effect)। প্রকৃতপক্ষে কিন্তু পরীক্ষা দ্বারা খুব কম ক্ষেত্রেই এইরূপ স্বাভাবিক জীমান ক্রিয়া দেখা যায়। কয়েক সহস্র গাওস পর্যন্ত চৌম্বকক্ষেত্রের প্রভাবে বেশীর ভাগ ক্ষেত্রেই বর্ণালীরেখাগুলি তিনের অধিক সংখ্যক রেখায় বিভাজিত হয়। এইরূপ বিভাজনকে বলা হয় 'অস্বাভাবিক জীমান ক্রিয়া' (Anomalous Zeeman Effect)। সনাতন তড়িৎচুম্বকীয় তত্ত্ব বা পুরাতন কোয়ানটাম তত্ত্বের সাহায্যে এই অস্বাভাবিক জীমান ক্রিয়া ব্যাখ্যা করা যায় না।

## 5. 2 : ইলেকট্রন ঘূর্ণন : ভেক্টর প্রতিরূপ

অস্বাভাবিক জীমান ক্রিয়া ব্যাখ্যা করার জন্য পরমাণুর মধ্যে ইলেকট্রনের আর একটি নূতন ধরনের গতি কল্পনা করতে হয়। এই গতি হল ইলেকট্রনের ঘূর্ণন (Spin) গতি। পৃথিবী যেমন সূর্যের চারিদিকে আবর্তন করবার সময় আপন মেরুদণ্ডকে বেষ্টন করে প্রতি চব্বিশ ঘণ্টায় একবার করে ঘূর্ণিত হয়, ইলেকট্রনটিও সেই রকম কেন্দ্রকের চারিদিকে

আবর্তন করবার সময় লাট্টুর মত ঘূর্ণিত হতে থাকে। ইলেকট্রনের এই প্রকার ঘূর্ণন সর্বপ্রথম কল্পনা করেন ১৯২৫ সালে গাইড্‌শ্‌মিট্‌ ও উলেনবেক্‌ (Goudschmidt and Uhlenbeck) নামক দুই বিজ্ঞানী, ক্ষারীয় (Alkali) পরমাণুর বর্ণালী ব্যাখ্যা করার জন্য।

আমরা জানি যে সব রকম আবর্তন গতির জন্য বস্তুর কৌণিক ভরবেগ থাকে। অতএব ঘূর্ণনের জন্যও ইলেকট্রনের কৌণিক ভরবেগ থাকে। গাইড্‌শ্‌মিট্‌ ও উলেনবেক্‌ দেখান যে ক্ষারীয় পরমাণুর বর্ণালী ব্যাখ্যা করতে হলে ইলেকট্রনের ঘূর্ণন জনিত কৌণিক ভরবেগ হওয়া উচিত

$$p_s = s\,\frac{h}{2\pi} \qquad (5.13)$$

এখানে $s = \frac{1}{2}$ হয়; $s$কে বলা হয় 'ঘূর্ণন কোয়ানটাম সংখ্যা' (Spin Quantum Number)। স্পষ্টতঃ ইলেকট্রনের ঘূর্ণন কৌণিক ভরবেগ $\boldsymbol{p}_s$ একটি ভেক্টর রাশি।

অতএব পরমাণুর মধ্যে ইলেকট্রনের দুই প্রকার কৌণিক ভরবেগ থাকে, কক্ষীয় কৌণিক ভরবেগ ($\boldsymbol{p}_k$) এবং উপরে আলোচিত ঘূর্ণন কৌণিক ভরবেগ ($\boldsymbol{p}_s$)। আধুনিক কোয়ানটাম বলবিদ্যায় কক্ষীয় কৌণিক ভরবেগের মান বোর-সমারফেল্ড তত্ত্বে অনুপ্রবিষ্ট ($p_k$) সংখ্যাটি থেকে ভিন্ন ধরা হয়। এই নূতন কক্ষীয় কৌণিক ভরবেগকে যদি $p_l$ চিহ্ন দ্বারা নির্দেশিত করা যায়, তাহলে লেখা যায়

$$p_l = l\,h/2\pi \qquad (5.14)$$

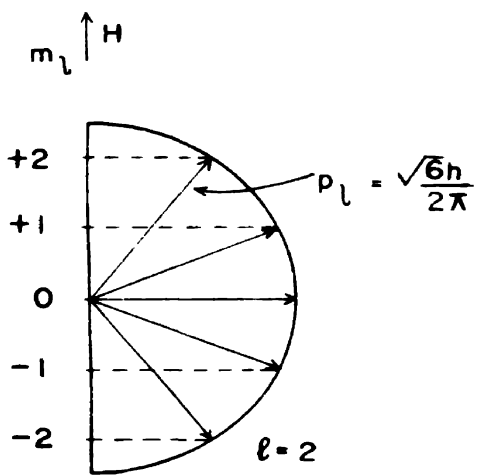
এখানে $l$ হচ্ছে নূতন তত্ত্বে অনুপ্রবিষ্ট কক্ষীয় কোয়ানটাম সংখ্যা যার সম্ভাব্য মান হচ্ছে $l = 0, 1, 2, 3 ... (n-1)$; অর্থাৎ $l = k-1$ ধরা যায়। $k$ হচ্ছে পুরাতন কোয়ানটাম তত্ত্বে অনুপ্রবিষ্ট কক্ষীয় কোয়ানটাম সংখ্যা।

এখানে উল্লেখযোগ্য যে বোর-সমারফেল্ড তত্ত্বে $k = 1$ কক্ষপথটি হচ্ছে সর্বাপেক্ষা বেশী চ্যাপটা একটি উপবৃত্ত, যার উপাক্ষ ও পরাক্ষের অনুপাত হচ্ছে $\frac{b}{a} = \frac{k}{n} = \frac{1}{n}$ (3.12 অনুচ্ছেদ দ্রষ্টব্য)। আধুনিক কোয়ানটাম বলবিদ্যা অনুযায়ী এক্ষেত্রে $l = 0$ হয়; অর্থাৎ ইলেকট্রনের কক্ষীয় কৌণিক ভরবেগ শূন্য হয়। সনাতন বলবিদ্যার (Classical Mechanics) তত্ত্ব অনুযায়ী ইলেকট্রনটি এক্ষেত্রে উপবৃত্তাকার কক্ষপথে আবর্তিত না হয়ে কেন্দ্রক ভেদ করে সরল সমঞ্জস (Simple Harmonic) রৈখিক গতিতে স্পন্দিত হবে। বস্তুতঃ আধুনিক কোয়ানটাম বলবিদ্যা তত্ত্বে বোর-সমারফেল্ড তত্ত্বের মত পরমাণুর মধ্যে নির্দিষ্ট কক্ষপথে ভ্রাম্যমান ইলেকট্রনের

প্রতিরূপ (Model) কল্পনা করা হয় না। কোয়ানটাম বলবিদ্যা তত্ত্বে কল্পনা করা হয় যে ইলেকট্রনের সমগ্র আধান যেন পরমাণুর কেন্দ্রককে বেষ্টন করে মেঘের মত বিস্তৃত হয়ে থাকে (7.11 অনুচ্ছেদ দ্রষ্টব্য)। এই আধান-মেঘ (Charge Cloud) কেন্দ্রকের চতুর্দিকে আবর্তনশীল হতেও পারে, আবার নাও হতে পারে। যখন এই মেঘ আবর্তনশীল হয় না, তখন ইলেকট্রনের কক্ষীয় কোয়ানটাম সংখ্যা $l=0$ হয়।

উপরের আলোচনা থেকে দেখা যায় যে পরমাণুর মধ্যে ইলেকট্রনের গতি ব্যাখ্যা করার জন্য প্রধান কোয়ানটাম সংখ্যা $n$, কক্ষীয় কোয়ানটাম সংখ্যা $l$ এবং ঘূর্ণন কোয়ানটাম সংখ্যা $s$, এই তিনটি কোয়ানটাম সংখ্যার প্রয়োজন। এছাড়া যখন চৌম্বকক্ষেত্র প্রযুক্ত হয়, তখন চৌম্বক কোয়ানটাম সংখ্যার $(m)$ প্রয়োজন হয়।

এখানে উল্লেখযোগ্য যে আধুনিক কোয়ানটাম বলবিদ্যা অনুযায়ী কক্ষীয় কৌণিক ভরবেগের মান সমীকরণ (5.14) থেকে প্রাপ্ত মান অপেক্ষা ভিন্ন হয়। উক্ত তত্ত্ব থেকে $p_l=\sqrt{l(l+1)}\,\frac{h}{2\pi}$ পাওয়া যায়। $l$এর মান অবশ্য পূর্বে প্রদত্ত মান থেকে অভিন্ন। প্রযুক্ত চৌম্বকক্ষেত্রে কিন্তু $p_l$ ভেক্টরটি এমন কতকগুলি দিকে বিন্যস্ত হতে পারে যে চৌম্বকক্ষেত্র অভিমুখে এর উপাংশের (Components) মান হয় $p_l\cos\theta=m_l\,h/2\pi$, যেখানে $m_l$ সংখ্যাটির সম্ভাব্য মানগুলি হয় $l, (l-1), \ldots -l$; অর্থাৎ $m_l$ এর মোট $(2l+1)$ সংখ্যক মান থাকা সম্ভব। চৌম্বকক্ষেত্র অভিমুখে $p_l$ এর বৃহত্তম উপাংশ $lh/2\pi$ হয়। অর্থাৎ এক্ষেত্রে $m_l=l$ হয়। উপরে প্রদত্ত $p_l$ ভেক্টরের মান অপেক্ষা এই বৃহত্তম উপাংশের মান ক্ষুদ্রতর হয়। স্পষ্টতঃ এক্ষেত্রেও $p_l$ প্রযুক্ত চৌম্বকক্ষেত্রের অভিমুখে বিন্যস্ত হতে পারে না। এই সিদ্ধান্ত পুরাতন কোয়ানটাম তত্ত্বলব্ধ সিদ্ধান্ত থেকে ভিন্ন। উক্ত তত্ত্বে, প্রযুক্ত চৌম্বকক্ষেত্রের অভিমুখে $p_k$ ভেক্টরটির বৃহত্তম উপাংশের মান $(kh/2\pi)$ হচ্ছে উক্ত ভেক্টরের মানের সমান; অর্থাৎ এক্ষেত্রে $p_k$ ভেক্টরটি প্রযুক্ত চৌম্বকক্ষেত্র অভিমুখে বিন্যস্ত থাকে। চৌম্বকক্ষেত্রে $p_l$ ভেক্টরের বিভিন্ন সম্ভাব্য দিগ্‌বিন্যাস (5·4) চিত্রে দেখান হয়েছে।

অনুরূপভাবে আধুনিক কোয়ানটাম তত্ত্ব অনুযায়ী ঘূর্ণন কৌণিক ভরবেগের মান হয় $p_s=\sqrt{s(s+1)}\,h/2\pi$, যেখানে $s=\frac{1}{2}$ হয়; এই মানও সমীকরণ (5.13) থেকে প্রাপ্ত মান অপেক্ষা ভিন্ন। বর্তমান আলোচনায় অবশ্য $p_s$ ও $p_l$ এর সমীকরণ (5.13) এবং (5.14) অনুযায়ী নির্ধারিত মানই ব্যবহার করা হবে।

চিত্র 5·4

প্রযুক্ত চৌম্বক ক্ষেত্রে $p_l$ ভেকটরের দিগ্‌বিন্যাস।

যেহেতু ইলেকট্রনের দুই প্রকার কৌণিক ভরবেগ $\boldsymbol{p}_l$ ও $\boldsymbol{p}_s$ দুটি ভেক্টর রাশি, অতএব ইলেকট্রনের মোট কৌণিক ভরবেগ $\boldsymbol{p}_j$ এই দুটি ভেক্টরের লব্ধি (Resultant)। অর্থাৎ আমরা লিখতে পারি

$$\boldsymbol{p}_j = \boldsymbol{p}_l + \boldsymbol{p}_s \tag{5·15}$$

কোয়ানটাম তত্ত্ব অনুযায়ী $p_j$ সংখ্যাটির মানও কোয়ানটায়িত হয়। যদি লেখা যায়

$$p_j = j\frac{h}{2\pi}{}^{*} \tag{5·16}$$

তাহলে $j$ সংখ্যাটির কতকগুলি নির্দিষ্ট মান থাকতে পারে। $j$-কে বলা হয় 'মোট কোয়ানটাম সংখ্যা' (Total Quantum Number)। অনেক সময় $\boldsymbol{p}_l$, $\boldsymbol{p}_s$ এবং $\boldsymbol{p}_j$ ভেক্টরগুলির বদলে তাদের সংশ্লিষ্ট $l$, $s$ এবং $j$ কোয়ানটাম সংখ্যাগুলিকে বিভিন্ন প্রকার কৌণিক ভরবেগ ভেক্টর রূপে নির্দেশ করা হয়। সেক্ষেত্রে (5·15) সমীকরণের পরিবর্তে পাওয়া যায়

$$\boldsymbol{j} = \boldsymbol{l} + \boldsymbol{s} \tag{5·17}$$

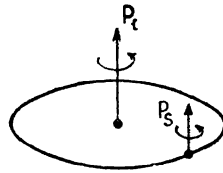
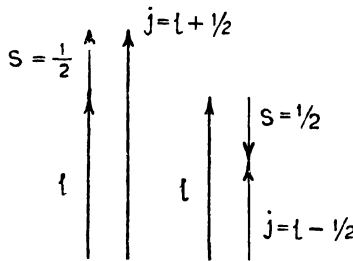
$\boldsymbol{j}$ ভেক্টরটির সম্ভাব্য মান নির্ণয় করতে হলে $\boldsymbol{l}$ এবং $\boldsymbol{s}$ এর পারস্পরিক দিগ্‌বিন্যাস কী রকম হয় তা জানা প্রয়োজন। এই দিগ্‌বিন্যাস সমারফেল্ডের স্থান কোয়াটায়ন সূত্রের সাহায্যে নির্ণয় করা যায়। $\boldsymbol{l}$ এবং $\boldsymbol{s}$ ভেকটর দুটির পারস্পরিক বিন্যাস এমন হয় যে মোট কৌণিক ভরবেগ $p_j$ কোয়ানটায়িত হয়। মোট কোয়ানটাম সংখ্যা $j$ এর সম্ভাব্য মানগুলি বৃহত্তম মান $(l+s)$ থেকে আরম্ভ করে এক একক পর পর ন্যূনতম মান $(l-s)$ পর্যন্ত বিস্তৃত হয়। অর্থাৎ মোট কোয়ানটাম সংখ্যার $(2s+1)$ সংখ্যক সম্ভাব্য মান থাকতে পারে। এগুলি হচ্ছে

$$j = (l+s), (l+s-1), \cdots\cdots (l-s)$$

স্পষ্টতঃ যখন $\boldsymbol{l}$ এবং $\boldsymbol{s}$ ভেকটর দুটি পরস্পরের সমান্তরাল হয়, তখন $\boldsymbol{j}$ বৃহত্তম হয়, আর $\boldsymbol{s}$ যখন $\boldsymbol{l}$ এর বিপরীতমুখী অর্থাৎ বিষমান্তরাল (Antiparallel) হয়, তখন $\boldsymbol{j}$ ন্যূনতম হয়। যেহেতু একটি মাত্র ইলেকট্রনের ক্ষেত্রে $s=\frac{1}{2}$, সুতরাং এক্ষেত্রে $j$ এর কেবল দুটি মান সম্ভব :

$$j = l \pm \tfrac{1}{2}$$

* বিঃ দ্রঃ। আধুনিক কোয়ানটাম বলবিদ্যা তত্ত্বে লেখা হয় $p_j = \sqrt{j(j+1)}\frac{h}{2\pi}$

**$l$** এবং **$s$** ভেক্টর দুটির উপরোক্ত দুই প্রকার সম্ভাব্য বিন্যাস (5·5) চিত্রে দেখান হয়েছে।

চিত্র 5·5

***s*** এবং ***l*** ভেক্টরের সংযোজনে ***j*** ভেক্টরের উৎপত্তি।

এখানে উল্লেখযোগ্য যে যদি $l > s$ হয়, তাহলে $j$ সংখ্যাটির মোট $(2s+1)$ সংখ্যক মান সম্ভব। অপরপক্ষে যদি $l < s$ হয়, তাহলে $j$ সংখ্যাটির মোট $(2l+1)$ সংখ্যক মান সম্ভব। শেষোক্ত ক্ষেত্রে $j$ এর ন্যূনতম মান $(s-l)$ হয়।

ইলেকট্রনের ঘূর্ণন গতির ফলে একটি তড়িৎপ্রবাহের সৃষ্টি হয়, যার জন্য ইলেকট্রনের একটা নিজস্ব চৌম্বক-ভ্রামক থাকে। এক্ষেত্রে উক্ত চৌম্বক-ভ্রামক $\mu_s$ এবং ইলেকট্রনের ঘূর্ণন কৌণিক ভরবেগ $p_s$ এর অনুপাত সমীকরণ (5·4) দ্বারা নির্ধারিত হয় না। ডিরাক্ ইলেকট্রন তত্ত্ব (Dirac Electron Theory) অনুযায়ী এই অনুপাতের মান হয়

$$\frac{\mu_s}{p_s} = g_s \times \frac{e}{2m_e c} \qquad (5{\cdot}18)$$

এখানে $g_s = 2$ ; অতএব

$$\frac{\mu_s}{p_s} = 2 \times \frac{e}{2m_e c}$$

সুতরাং $\mu_s = \frac{e}{m_e c} \cdot s \frac{h}{2\pi} = \frac{eh}{4\pi m_e c} = \mu_B$ (5·19)

অর্থাৎ ইলেকট্রনের নিজস্ব চৌম্বক-ভ্রামকের মান বোর-ম্যাগনেটনের সমান। এই চৌম্বক-ভ্রামক ভেক্টরটি ঘূর্ণন কৌণিক ভরবেগ ভেক্টরের বিপরীতমুখী। ইতিপূর্বে দেখা গেছে যে পরমাণুর মধ্যে আবর্তনের জন্য ইলেকট্রনের একটি কক্ষীয় চৌম্বক-ভ্রামক থাকে, যার মান হচ্ছে $\mu_k = k\mu_B$ ( সমীকরণ 5·5 দ্রষ্টব্য )। আধুনিক কোয়ানটাম তত্ত্ব অনুযায়ী উক্ত কক্ষীয় চৌম্বক-ভ্রামকের মান হবে

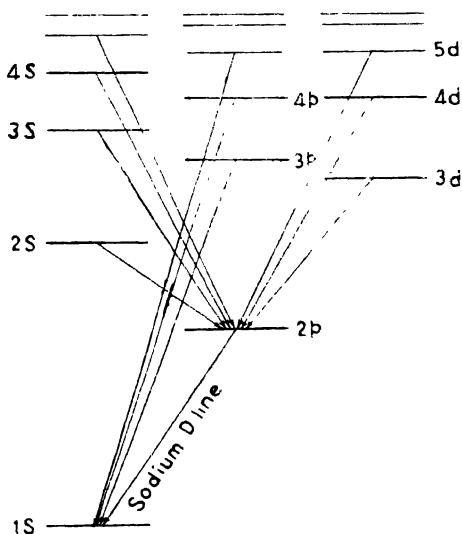
$$\mu_l = \frac{e}{2m_e c} p_l = l\mu_B \tag{5·20}$$

$\mu_l$ এবং $\mu_s$, ইলেকট্রনের এই দুই প্রকার চৌম্বক-ভ্রামকের মধ্যে চৌম্বক বিক্রিয়ার ফলে নির্দিষ্ট $l$ সম্পন্ন প্রতিটি শক্তিস্তর $j = l + \frac{1}{2}$ এবং $j = l - \frac{1}{2}$, এই দুটি শক্তিস্তরে বিভাজিত হয়ে যায়। $\mu_l$ এবং $\mu_s$ এর মধ্যে উপরোক্ত চৌম্বক বিক্রিয়ার ফলে এদের শক্তির মধ্যে অল্প পার্থক্য থাকে। পরমাণুর মধ্যে ইলেকট্রনের দুই প্রকার কৌণিক ভরবেগ ভেক্টরের লব্ধি (Resultant) নির্ণয় করে পরমাণুর মোট কৌণিক ভরবেগ প্রতিপন্ন করার পদ্ধতিকে বলা হয় পরমাণুর 'ভেক্টর প্রতিরূপ' (Vector Model of the Atom)। দুই বা ততোধিক ইলেকট্রনের ক্ষেত্রে পরমাণুর মোট কৌণিক ভরবেগ প্রতিপন্ন করার জন্য এইরূপ ভেক্টর প্রতিরূপের ব্যবহার খুব সুবিধাজনক।

## 5·3 : ক্ষারীয় পরমাণুর বর্ণালী ঃ বর্ণালীর বহুলতা

ইলেকট্রনের ঘূর্ণন গতি বিবেচনা করে ক্ষারীয় পরমাণুর বর্ণালী ব্যাখ্যা করা সম্ভব—একথা পূর্ব অনুচ্ছেদে বলা হয়েছে। একাধিক ইলেকট্রন সম্পন্ন বিভিন্ন মৌলের পরমাণুর মধ্যে ইলেকট্রনগুলি কয়েকটি বিভিন্ন কক্ষপথে বিন্যস্ত থাকে ( 5·4 অনুচ্ছেদ দ্রষ্টব্য )। লিথিয়াম, সোডিয়াম, পটাসিয়াম প্রভৃতি ক্ষারীয় মৌলের পরমাণুতে সর্বাপেক্ষা বহিস্থ কক্ষপথে একটিমাত্র ইলেকট্রন থাকে। বাকী $(Z-1)$ সংখ্যক ইলেকট্রন কেন্দ্রককে বেষ্টন করে কতকগুলি

পরিপূর্ণ খোলসের (Closed Shell) মধ্যে অবস্থিত থেকে আবর্তিত হতে থাকে। যেহেতু এই ইলেকট্রনগুলির মোট ঋণাত্মক আধান কেন্দ্রকের $Z$ একক পরিমাণ ধণাত্মক আধানকে আড়াল (Screen) করে রাখে, সেইজন্য বহিস্থ ইলেকট্রনটি মাত্র এক একক ধনাত্মক আধানের প্রভাবে আবর্তিত হতে থাকে। সেই হিসাবে এই পরমাণুগুলির বহিরঞ্চলের ইলেকট্রনীয় গঠন কতকটা হাইড্রোজেন সদৃশ পরমাণুর অনুরূপ। এদের বর্ণালী মূলতঃ এই বহিস্থ কক্ষপথে আবর্তনশীল সংযোজী (Valence) ইলেকট্রনটির গতির উপরই নির্ভর করে।

হাইড্রোজেন সদৃশ পরমাণুর শক্তিস্তরগুলির শক্তির পরিমাণ নির্ভর করে প্রধানতঃ $n$ ও $l$ দুটি কোয়ানটাম সংখ্যার উপর। নির্দিষ্ট $n$ সম্পন্ন প্রত্যেকটি শক্তিস্তর আপেক্ষিকতাবাদ জনিত ইলেকট্রনের ভর পরিবর্তনের জন্য $n$ সংখ্যক

চিত্র 5·6

সোডিয়ামের শক্তিস্তর চিত্র। এই চিত্রে ইলেকট্রনের ঘূর্ণন উপেক্ষা করা হয়েছে।

স্তরে বিভাজিত হয়ে যায়, একথা (3·12) অনুচ্ছেদে বলা হয়েছে। ক্ষারীয় পরমাণুর ক্ষেত্রে নির্দিষ্ট $n$ ও $l$ সম্পন্ন বহিস্থ কক্ষপথে আবর্তনশীল অবস্থায় ইলেকট্রনটি পরমাণুর ভিতরের দিকের কক্ষপথগুলির মধ্যেও কিছুটা অনুপ্রবেশ

করে, যার ফলে এর উপরে কেন্দ্রকীয় আধানের প্রভাব কিছু বৃদ্ধি পায়। ভিতরের দিকের কক্ষপথে বহিস্থ সংযোজী ইলেকট্রনের এই প্রকার অনুপ্রবেশের পরিমাণ নির্ভর করে $l$ এর মানের উপর। $l$ যত ছোট হয়, এই অনুপ্রবেশ তত বেশী হয়। ফলে $l=0$ কক্ষপথে আবর্তনশীল ইলেকট্রনের শক্তি ও বোর তত্ত্ব থেকে প্রাপ্ত হাইড্রোজেন সদৃশ পরমাণুর শক্তিস্তরের শক্তির মধ্যে পার্থক্য সর্বাপেক্ষা বেশী হয়। $l$ যত বড় হয় এই পার্থক্যও তত কমে। এই পার্থক্যের মান সাধারণতঃ হাইড্রোজেন সদৃশ পরমাণুর ক্ষেত্রে প্রাপ্ত আপেক্ষিকতাবাদ জনিত অনুরূপ পার্থক্য (সমীকরণ 3·31) অপেক্ষা পরিমাণে অনেক বেশী হয়। ফলে ক্ষারীয় পরমাণুর বর্ণালীরেখাগুলি সংখ্যায় অপেক্ষাকৃত অনেক বেশী হয়। (5·6) চিত্রে সোডিয়াম পরমাণুর শক্তিস্তর-সমূহের অবস্থান এবং সম্ভাব্য সংক্রমণগুলি-দেখান হয়েছে। এখানে উল্লেখযোগ্য যে বর্ণালী বিশ্লেষকগণ ক্ষারীয় পরমাণুর বিভিন্ন $l$ সম্পন্ন শক্তিস্তর বা পদগুলির কতকগুলি বিশেষ নামকরণ করেছেন। যথা $l=0$ পদগুলিকে বলা হয় S পদ ; $l=1$ পদগুলিকে বলা হয় P পদ ; $l=2$ পদগুলিকে বলা হয় D পদ ; $l=3$ পদগুলিকে বলা হয় F পদ ; ইত্যাদি।

(5·6) চিত্রে উপরোক্ত নামগুলি ( ছোট হরফে ) ব্যবহার করা হয়েছে। চিত্রে S, P, D প্রভৃতি অক্ষরের বাম পার্শ্বে যে সংখ্যাগুলি লেখা হয়েছে সেগুলি শক্তিস্তরের প্রধান কোয়ানটাম সংখ্যা $n$ নির্দেশ করে। উদাহরণ-স্বরূপ 1S শক্তিস্তরের ক্ষেত্রে $n=1$ এবং $l=0$ হয় ; 2P স্তরের ক্ষেত্রে $n=2$ এবং $l=1$ হয় ; ইত্যাদি। এই শক্তিস্তরগুলির মধ্যে সংক্রমণ হাইড্রোজেন সদৃশ পরমাণুর ন্যায় নিম্নলিখিত নির্বাচন সূত্র দ্বারা নির্ধারিত হয় ( সমীকরণ 3·33 দ্রষ্টব্য ) ঃ

$$\Delta l = \pm 1 \tag{5·21}$$

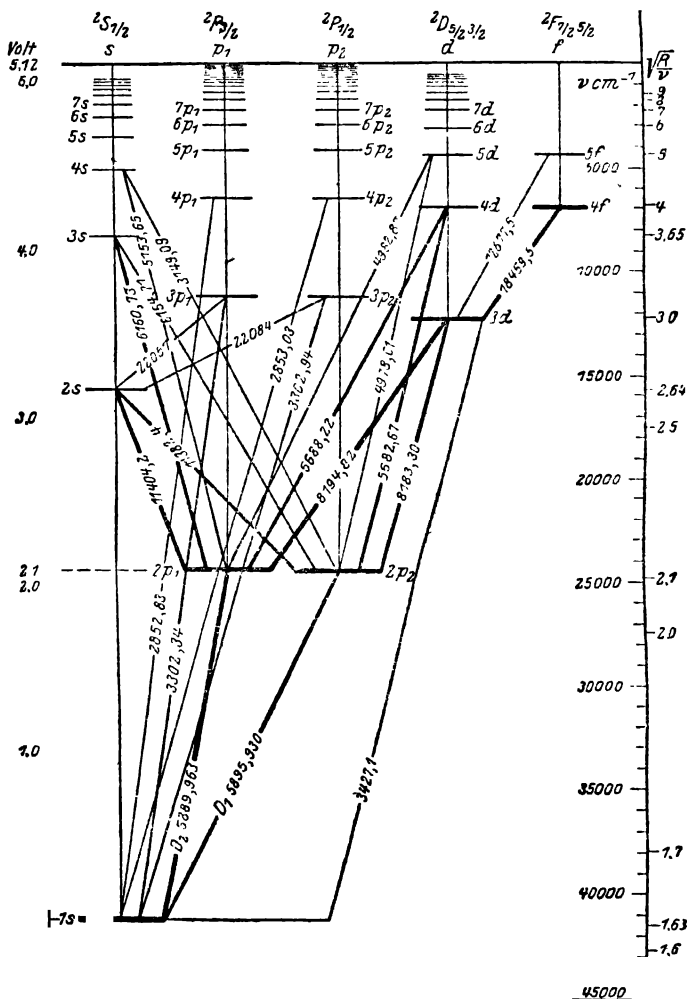
অর্থাৎ S পদ থেকে কেবল P পদে সংক্রমণ সম্ভব, P পদ থেকে S বা D পদে সংক্রমণ সম্ভব, ইত্যাদি। এই সব সংক্রমণের ফলে যে বর্ণালী শ্রেণীসমূহ উৎপন্ন হয় তাদের মধ্যে নিম্নলিখিত শ্রেণীগুলি সর্বাপেক্ষা গুরুত্বপূর্ণ ঃ

$n$P→1S প্রধান (Principal) শ্রেণী ;
$n$S→2P তীব্র (Sharp) শ্রেণী ;
$n$D→2P বিক্ষিপ্ত (Diffuse) শ্রেণী ;
$n$F→3D মূল (Fundamental) শ্রেণী।

(5·6) চিত্রে এইসব বিভিন্ন শ্রেণী উৎপাদনকারী সংক্রমণগুলি দেখান হয়েছে। এদের মধ্যে সোডিয়ামের ক্ষেত্রে প্রধান (Principal) শ্রেণীভুক্ত D বর্ণালীরেখাটি সুপরিচিত। হলুদ বর্ণের এই বর্ণালীরেখা সোডিয়াম ধাতু থেকে নিঃসৃত আলোকের বর্ণালীতে খুবই প্রকট এবং সহজেই দেখা যায়। $2P \rightarrow 1S$ সংক্রমণের ফলে এই রেখাটির উদ্ভব হয়। ইতিপূর্বে হাইড্রোজেন সদৃশ পরমাণুর ক্ষেত্রে দেখা গেছে প্রতিটি বর্ণালীরেখার কম্পাংক দুটি পদের অন্তরফল রূপে প্রকাশ করা যায় ( 3·14 সমীকরণ দ্রষ্টব্য )। অনুরূপভাবে ক্ষারীয় পরমাণুর ক্ষেত্রেও নিঃসৃত প্রত্যেক বর্ণালীরেখার কম্পাংক $R/(n+\varepsilon)^2$, এই ধরনের দুটি পদের অন্তরফল হিসাবে লেখা যায়। এখানে $R$ হচ্ছে পূর্বোল্লিখিত রিডবার্গ ধ্রুবক। $n' = (n+\varepsilon)$ সংখ্যাটিকে বলা হয় 'কার্যকরী (Effective) প্রধান কোয়ানটাম সংখ্যা'। $n'$ সাধারণতঃ একটি পূর্ণসংখ্যা হয় না। কারণ $n$ পূর্ণসংখ্যা হলেও $\varepsilon$ সংখ্যাটির মান এক অপেক্ষা কম হয়। $\varepsilon$ সংখ্যাটিকে বলা হয় 'কোয়ানটাম ত্রুটি' (Quantum Defect)। S, P, D, F প্রভৃতি বিভিন্ন পদের ক্ষেত্রে $\varepsilon$ ভিন্ন হয়। এদের মধ্যে যে কোন একটি শ্রেণীর বিভিন্ন $n$-এর জন্য সাধারণতঃ $\varepsilon$ প্রায় ধ্রুবক হয়। $l$ যত ছোট হয়, অর্থাৎ উপবৃত্তাকার কক্ষপথ যত বেশী চ্যাপটা হয়, $\varepsilon$ তত বড় হয়। আবার $l$ বড় হলে $\varepsilon$ ছোট হয়। $l=3$, অর্থাৎ $f$ পদের ক্ষেত্রে $\varepsilon$ প্রায় শূন্য হয়। সুতরাং $f$ পদগুলির মান প্রায় হাইড্রোজেনের পদগুলির সমান হয়। এর কারণ হচ্ছে যে $l$ বড় হলে বহিস্থ ইলেকট্রনটির উপবৃত্তাকার কক্ষপথ কম চ্যাপটা হয়, যার ফলে সেটি আভ্যন্তরীণ কক্ষপথের মধ্যে বিশেষ অনুপ্রবেশ করে না। সুতরাং এর গতি প্রায় হাইড্রোজেন সদৃশ পরমাণুর ইলেকট্রনের গতির সমরূপ হয়।

পরীক্ষা করে দেখা গেছে যে সোডিয়াম D বর্ণালীরেখাটি একক নয়। প্রায় 6 অ্যাংষ্ট্রম ব্যবধানে অবস্থিত দুটি রেখার দ্বারা এটি গঠিত। একটি সাধারণ বর্ণালীমাপক যন্ত্রের (Spectrometer) সাহায্যে সোডিয়াম D-রেখার এই দ্বৈত গঠন (Doublet Structure) সহজেই দেখতে পাওয়া যায়। এই দুটিকে $D_1$ ও $D_2$ রেখা বলা হয়। এদের তরঙ্গদৈর্ঘ্য যথাক্রমে 5896 অ্যাং ও 5890 অ্যাং হয়। বস্তুতঃ ক্ষারীয় পরমাণুগুলির প্রধান (Principal) শ্রেণীভুক্ত সব বর্ণালীরেখারই এইরূপ দ্বৈত গঠন দেখতে পাওয়া যায়।

এই দ্বৈত গঠন ব্যাখ্যা করা যায় ইলেকট্রনের ঘূর্ণন গতি (Spin

Motion) বিবেচনা করে। ঘূর্ণন গতির জন্য নির্দিষ্ট $l$ সম্পন্ন ইলেকট্রনের মোট কোয়ানটাম সংখ্যা $j$-এর দুটি মান থাকতে পারে ($j=l\pm\frac{1}{2}$), একথা পূর্ব অনুচ্ছেদে বলা হয়েছে। কক্ষীয় চৌম্বক-ভ্রামক $\mu_l$ এবং ঘূর্ণন চৌম্বক-ভ্রামক

চিত্র 5·7

সোডিয়াম বর্ণালী রেখার দ্বৈত গঠনের উৎপত্তি। D এবং F পদের ঘূর্ণন জনিত বিভাজন খুব কম হয়। সেজন্য এগুলিকে স্বতন্ত্রভাবে দেখান হয়নি।

$\mu_s$ এর মধ্যে চৌম্বক ক্রিয়ার ফলে নির্দিষ্ট $n$ ও $l$ সম্পন্ন প্রত্যেকটি শক্তিস্তর কাছাকাছি অবস্থিত দুটি স্তরে বিভাজিত হয়ে যায়। একটির ক্ষেত্রে $j = l + \frac{1}{2}$ হয়, অন্যটির ক্ষেত্রে $j = l - \frac{1}{2}$ হয়। শক্তিস্তরসমূহের এইরূপ বিভাজনকে বলা হয় শক্তিস্তরের 'বহুলতা' (Multiplicity)। ক্ষারীয় ধাতুর ক্ষেত্রে এই বহুলতার মান দুই হয়। সাধারণতঃ একাধিক ইলেকট্রন সম্পন্ন পরমাণুর ক্ষেত্রে যদি ঘূর্ণন কোয়ানটাম সংখ্যা হয় $S$, তাহলে বহুলতার মান হয় $(2S+1)$। অর্থাৎ প্রতিটি স্তর $(2S+1)$ সংখ্যক স্তরে বিভাজিত হয়ে যায়।

(5·7) চিত্রে সোডিয়াম পরমাণুর শক্তিস্তরগুলির এই দ্বৈত গঠন (Doublet Structure) দেখান হয়েছে। চিত্র থেকে দেখা যায় যে P, D, F প্রভৃতি পদগুলির প্রত্যেকটির দ্বৈত গঠন থাকে। P পদের ক্ষেত্রে $j = \frac{3}{2}$ এবং $\frac{1}{2}$ হতে পারে। এই দুটি পদকে $^2P_{\frac{3}{2}}$ এবং $^2P_{\frac{1}{2}}$ চিহ্ন দ্বারা নির্দেশিত করা হয়। অনুরূপভাবে D পদগুলির ক্ষেত্রে $j = \frac{5}{2}$ এবং $\frac{3}{2}$ হয়। এই পদগুলিকে $^2D_{\frac{5}{2}}$ ও $^2D_{\frac{3}{2}}$ চিহ্ন দ্বারা নির্দেশিত করা হয়। পদ নির্দেশকারী P, D প্রভৃতি অক্ষরগুলির বামদিকের শীর্ষাংক (Superscript) 2 সংখ্যার দ্বারা পদগুলির বহুলতা নির্দেশ করা হয়েছে। আর অক্ষরগুলির ডান দিকের পাদাংক (Subscript) দ্বারা পদগুলির $j$-এর মান নির্দেশ করা হয়েছে। এখানে উল্লেখযোগ্য যে $l = 0$ অর্থাৎ S পদগুলি একক হয়। এক্ষেত্রে মোট কোয়ানটাম সংখ্যা $j$-এর একটি মাত্র মান সম্ভব, $j = \frac{1}{2}$ ; কারণ $j$ সব সময় ধনাত্মক হয়। যদিও S পদগুলি একক হয়, তবুও এগুলিকে $^2S_{\frac{1}{2}}$ এইরূপ চিহ্ন দ্বারা নির্দেশিত করা হয়।

ইলেকট্রন ঘূর্ণনের ফলে বিভাজিত শক্তিস্তরসমূহের মধ্যে সম্ভাব্য সংক্রমণগুলি নিম্নলিখিত নির্বাচন সূত্র (Selection Rule) দ্বারা নির্ধারিত হয় ঃ

$$\Delta j = 0, \pm 1 \qquad (5·22)$$

অর্থাৎ সেইসব সংক্রমণ সম্ভব হয় যাদের ক্ষেত্রে হয় মোট কোয়ানটাম সংখ্যা $j$ পরিবর্তিত হয় না, আর না হয় মাত্র এক একক পরিমাণে পরিবর্তিত হয়।

(5·21) ও (5·22) এই দুটি নির্বাচন সূত্রের সাহায্যে ক্ষারীয় পরমাণুর বর্ণালীরেখাগুলির সূক্ষ্ম গঠন (Fine Structure) সহজেই ব্যাখ্যা করা

সম্ভব। উদাহরণস্বরূপ প্রধান শ্রেণীর ($n\mathrm{P} \rightarrow 1\mathrm{S}$) অন্তর্গত বর্ণালীরেখা-সমূহের ক্ষেত্রে নিম্নলিখিত সংক্রমণগুলি সম্ভবপর :

$$n^2\mathrm{P}_{\frac{1}{2}} \rightarrow 1^2\mathrm{S}_{\frac{1}{2}} \;\; (\Delta j = 0)$$

$$n^2\mathrm{P}_{\frac{3}{2}} \rightarrow 1^2\mathrm{S}_{\frac{1}{2}} \;\; (\Delta j = -1)$$

স্পষ্টতঃ এই রেখাগুলির দ্বৈত গঠন থাকবে। সোডিয়াম D রেখা দুটির উৎপত্তি হয় নিম্নলিখিত দুটি সংক্রমণের ফলে : $2^2\mathrm{P}_{\frac{1}{2}} \rightarrow 1^2\mathrm{S}_{\frac{1}{2}}$ ( $\mathrm{D}_1$ রেখা ) এবং $2\ ^2\mathrm{P}_{\frac{3}{2}} \rightarrow 1\ ^2\mathrm{S}_{\frac{1}{2}}$ ( $\mathrm{D}_2$ রেখা )।

(5·7) চিত্রে সোডিয়ামের ক্ষেত্রে বিভিন্ন বর্ণালীরেখার উপরোক্ত দ্বৈত গঠনের উৎপত্তিকারক সংক্রমণগুলি দেখান হয়েছে।

## 5·4 : পাউলির অপবর্জন মতবাদ ; মৌলসমূহের পর্যায় সারণী

১৮৬৯ সালে রাশিয়ান বিজ্ঞানী মেণ্ডেলিয়েভ (D. Mendeleev) বিভিন্ন মৌলগুলিকে ক্রমবর্ধমান পরমাণবিক ভার অনুযায়ী একটি সারণীতে এমন ভাবে সাজান যে সারণীর যে কোন স্তম্ভে মৌলগুলির ভৌতিক ও রাসায়নিক ধর্মাবলীর মধ্যে যথেষ্ট সাদৃশ্য দেখা যায় ( পরিশিষ্ট A-4 দ্রষ্টব্য )। পরমাণুর মধ্যে ইলেকট্রনের গতি ব্যাখ্যা করার জন্য যে কোয়ানটাম সংখ্যাগুলি উপরে আলোচিত হয়েছে সেইগুলির সাহায্যে মেণ্ডেলিয়েভ উদ্ভাবিত এই পর্যায় সারণীর (Periodic Table) ব্যাখ্যা করা সম্ভব।

আমরা দেখেছি যে পরমাণুর মধ্যে ইলেকট্রনের শক্তি নিরূপিত হয় $n$, $l$, $s$ এবং $j$, এই চারটি কোয়ানটাম সংখ্যার দ্বারা। এখন একটি পরমাণুকে যদি চৌম্বক ক্ষেত্রের মধ্যে স্থাপিত করা হয় তাহলে তার মোট চৌম্বক-ভ্রামক $\mu_j$ উক্ত ক্ষেত্রের দিক বেষ্টন করে অয়নচলন (Precession) গতিতে আবর্তন করে। চৌম্বক ক্ষেত্রের সাপেক্ষে পরমাণুর মোট কৌণিক ভরবেগ ভেক্টর $\boldsymbol{j}$ সমারফেল্ডের স্থান কোয়ানটায়ন সূত্র অনুযায়ী $(2j+1)$ বিভিন্ন দিকে বিন্যস্ত পারে ( 5.1 অনুচ্ছেদ দ্রষ্টব্য )। সেজন্য নির্দিষ্ট $n$, $l$ ও $j$ সম্পন্ন শক্তি-স্তরগুলি $(2j+1)$ সংখ্যক স্তরে বিভাজিত হয়ে যায়। এই বিভাজিত স্তরগুলিকে 'মোট চৌম্বক কোয়ানটাম সংখ্যা' $m_j$ দ্বারা নির্দেশিত করা যায়। $m_j$ সংখ্যাটির নিম্নলিখিত মানগুলি সম্ভব :

$$m_j = j,\ j-1,\ j=2, \cdots -j$$

এখন যদি প্রযুক্ত চৌম্বক ক্ষেত্রের মান $H$ ক্রমশঃ বাড়ান যায়, তাহলে উক্ত

চৌম্বক ক্ষেত্র ইলেকট্রনের লব্ধি চৌম্বক-ভ্রামক $\mu_j$ এর উপর ক্রিয়া না করে $\mu_l$ এবং $\mu_s$ চৌম্বক-ভ্রামক দুটির উপর স্বতন্ত্রভাবে ক্রিয়া করে। অর্থাৎ উচ্চ চৌম্বক ক্ষেত্রের প্রভাবে $\mu_l$ ও $\mu_s$ এর পারস্পরিক চৌম্বক সংযোজন (Magnetic Coupling) বাতিল হয়ে যায় এবং এদের প্রত্যেকটি স্বতন্ত্রভাবে চৌম্বক ক্ষেত্রকে অক্ষ করে অয়নচলন গতিতে আবর্তিত হতে থাকে। কাজেই এক্ষেত্রে আর মোট কৌণিক ভরবেগ $j$ বিবেচনা করার কোন প্রয়োজন থাকে না। মোট চৌম্বক কোয়ানটাম সংখ্যা $m_j$ এর পরিবর্তে এখন কক্ষীয় চৌম্বক কোয়ানটাম সংখ্যা $m_l$ এবং ঘূর্ণন চৌম্বক কোয়ানটাম সংখ্যা $m_s$ দ্বারা শক্তিস্তরগুলির বিভাজন নিরূপিত হয়।

সুতরাং প্রযুক্ত উচ্চ চৌম্বক ক্ষেত্রে পরমাণু মধ্যস্থ ইলেকট্রনের গতি এবং শক্তি নিরূপিত হয় $n$, $l$, $m_l$ এবং $m_s$ এই চারটি কোয়ানটাম সংখ্যার দ্বারা। যেহেতু সব ইলেকট্রনের ঘূর্ণন কোয়ানটাম সংখ্যার মান সমান হয় ($s = \frac{1}{2}$), অতএব ইলেকট্রনের শক্তি নিরূপণের জন্য এই কোয়ানটাম সংখ্যাটিকে পৃথকভাবে বিবেচনা না করলেও চলে। পরমাণু মধ্যস্থ বিভিন্ন ইলেকট্রনের ক্ষেত্রে উপরোক্ত চারটি কোয়ানটাম সংখ্যার সম্ভাব্য মান নিরূপণ করবার জন্য পাউলি (W. Pauli) ১৯২৫ সালে একটি অত্যন্ত গুরুত্বপূর্ণ মতবাদের প্রস্তাবনা দেন। একে বলা হয় 'পাউলির অপবর্জন মতবাদ' (Pauli's Exclusion Principle)। এই মতবাদ অনুসারে একটি পরমাণুর মধ্যে যে কোন দুটি ইলেকট্রনের ক্ষেত্রে $n$, $l$, $m_l$ ও $m_s$, এই কোয়ানটাম সংখ্যার সবগুলিই সমান হতে পারে না। অর্থাৎ কোন দুটি ইলেকট্রনের ক্ষেত্রে যদি তিনটি কোয়ানটাম সংখ্যা (যথা $n$, $l$ ও $m_l$) সমান হয়, তাহলে চতুর্থটির ($m_s$ এর) মান দুটি ইলেকট্রনের জন্য পৃথক হবে।

পাউলির উপরোক্ত মতবাদের সাহায্যে বিভিন্ন পরমাণুর মধ্যে ইলেকট্রনগুলি কী ভাবে বিন্যস্ত থাকে তা নির্ণয় করা যেতে পারে।

ইতিপূর্বে আমরা দেখেছি যে নির্দিষ্ট $n$ সম্পন্ন ইলেকট্রনীয় কক্ষপথ $n$ সংখ্যক উপকক্ষপথে বিভাজিত হয়ে যায়। প্রত্যেকটি উপকক্ষপথের জন্য $l$ সংখ্যাটির এক একটি নির্দিষ্ট মান থাকে, যথা $l = 0, 1, 2, \cdots (n-1)$। $n = 1$ কক্ষপথ বা খোলসকে বলা হয় K কক্ষপথ বা K খোলস (K Shell)। অনুরূপভাবে $n = 2$ খোলসকে বলা হয় L খোলস, (L Shell), $n = 3$ খোলসকে বলা হয় M খোলস (M Shell) ইত্যাদি। আবার $l = 0, 1, 2, 3$ ইত্যাদি উপকক্ষপথগুলিকে যথাক্রমে

$s, p, d, f$ ইত্যাদি চিহ্ন দ্বারা নির্দেশিত করা হয়। আমরা জানি যে প্রযুক্ত চৌম্বক ক্ষেত্রে নির্দিষ্ট $l$ সম্পন্ন শক্তিস্তর $(2l+1)$ সংখ্যক স্তরে বিভাজিত হয়। এদের প্রত্যেকটির জন্য $m_l$ সংখ্যাটির এক একটি নির্দিষ্ট মান থাকে ; যথা $m_l = 0, \pm 1, \pm 2, \cdots \pm l$, এই মানগুলি সম্ভব। আবার নির্দিষ্ট $m_l$ সম্পন্ন এইরূপ যে কোন বিভাজিত শক্তিস্তরে ইলেকট্রনের ঘূর্ণন চৌম্বক কোয়ানটাম সংখ্যা $m_s$ এর দুটি ভিন্ন মান সম্ভব ঃ $m_s = +\frac{1}{2}$ এবং $m_s = -\frac{1}{2}$ ; এই দুই ক্ষেত্রে ইলেকট্রনের শক্তির মান ভিন্ন হয়। কাজেই নির্দিষ্ট $l$ সম্পন্ন উপকক্ষপথে আবর্তনরত ইলেকট্রনের জন্য মোট $2(2l+1)$ শক্তিস্তর থাকতে পারে। অতএব নির্দিষ্ট $n$ সম্পন্ন খোলসে অবস্থিত ইলেকট্রনের সম্ভাব্য শক্তিস্তরের মোট সংখ্যা হবে ঃ

$$2\sum_{l=0}^{(n-1)} (2l+1) = 2n^2 \qquad (5{\cdot}23)$$

উপরের আলোচনা থেকে বিভিন্ন খোলসের মধ্যে সম্ভাব্য সর্বাধিক ইলেকট্রন সংখ্যা সহজেই নির্ণয় করা যায়। (5·1) সারণীতে এই সংখ্যাগুলি লিপিবদ্ধ করা হয়েছে।

**সারণী—5·1**

| খোলস | K | L | | M | | | N | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $n$ | 1 | 2 | | 3 | | | 4 | | | |
| উপকক্ষপথ | $s$ | $s$ | $p$ | $s$ | $p$ | $d$ | $s$ | $p$ | $d$ | $f$ |
| $l$ | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 2 | 0 | 1 | 2 | 3 |
| উপকক্ষপথের মধ্যে সম্ভাব্য সর্বাধিক ইলেকট্রন সংখ্যা $2(2l+1)$ | 2 | 2 | 6 | 2 | 6 | 10 | 2 | 6 | 10 | 14 |
| খোলসের মধ্যে সম্ভাব্য সর্বাধিক ইলেকট্রন সংখ্যা $2n^2$ | 2 | 8 | | 18 | | | 32 | | | |

উদাহরণস্বরূপ $1s$ উপকক্ষপথটিতে সম্ভাব্য সর্বাধিক ইলেকট্রন সংখ্যা কী হতে পারে তা হিসাব করা যাক। এক্ষেত্রে $n=1$, $l=0$ হয়; অতএব $m_l=0$ হয়। যেহেতু $m_s=+\frac{1}{2}$ বা $-\frac{1}{2}$ হতে পারে, সুতরাং $1s$ উপকক্ষপথে সর্বাধিক দুটি ইলেকট্রন থাকতে পারে। যদি এই উপকক্ষপথে দুটি ইলেকট্রনই বর্তমান থাকে, তাহলে এই ইলেকট্রনগুলিকে $1s^2$ এই চিহ্ন দ্বারা নির্দেশিত করা যায়; অপরপক্ষে যদি একটি মাত্র ইলেকট্রন এই উপকক্ষপথে বর্তমান থাকে, তাহলে সেটিকে $1s^1$ চিহ্ন দ্বারা নির্দেশিত করা যায়। তৃতীয় আর একটি ইলেকট্রন এই উপকক্ষপথে থাকতে পারে না। কারণ এর মধ্যে বর্তমান ইলেকট্রনগুলির ক্ষেত্রে $n$, $l$ ও $m_l$ সমান হয়, তা আমরা উপরে দেখেছি। সুতরাং পাউলির অপবর্জন মতবাদ অনুযায়ী প্রত্যেকটি ইলেকট্রনের জন্য $m_s$ এর মান পৃথক হতে হবে। কিন্তু যেহেতু $m_s$ সংখ্যাটির মাত্র দুটি মান সম্ভব, অতএব তৃতীয় কোন ইলেকট্রন এই কক্ষপথে স্থাপিত করতে গেলে তা পাউলির অপবর্জন মতবাদের পরিপন্থী হবে। কারণ প্রথম দুটি ইলেকট্রনের একটির ক্ষেত্রে $m_s=+\frac{1}{2}$ অন্যটির ক্ষেত্রে $m_s=-\frac{1}{2}$ হয়। সুতরাং তৃতীয় ইলেকট্রনটির জন্য 1S খোলসে আর স্থান থাকতে পারে না। সেটির স্থান L খোলসে হতে পারে। L খোলসের মধ্যে দুটি উপকক্ষপথ থাকে, $l=0$ এবং $l=1$; এর মধ্যে $l=0$ উপকক্ষপথে পূর্বের মত সর্বাধিক দুটি ইলেকট্রন থাকতে পারে। $l=1$ উপকক্ষপথে $m_l$ সংখ্যাটির তিনটি মান থাকতে পারে—$m_l=+1$, $0$ বা $-1$; প্রত্যেকটির ক্ষেত্রে $m_s$ এর মান $+\frac{1}{2}$ এবং $-\frac{1}{2}$ হতে পারে। এই উপকক্ষপথে বর্তমান ইলেকট্রনগুলির সম্ভাব্য কোয়ানটাম সংখ্যাগুলি (5·2) সারণীতে লিপিবদ্ধ করা হয়েছে:

**সারণী 5·2**

| $n$ | $l$ | $m_l$ | $m_s$ |
|---|---|---|---|
| 2 | 1 | +1 | $+\frac{1}{2}$ |
| 2 | 1 | +1 | $-\frac{1}{2}$ |
| 2 | 1 | 0 | $+\frac{1}{2}$ |
| 2 | 1 | 0 | $-\frac{1}{2}$ |
| 2 | 1 | −1 | $+\frac{1}{2}$ |
| 2 | 1 | −1 | $-\frac{1}{2}$ |

উপরের সারণী থেকে দেখা যায় এই ছয়টি ইলেকট্রনের কোন দুটিরই সবগুলি কোয়ানটাম সংখ্যা সমান নয়। কাজেই পাউলির অপবর্জন মতবাদ এখানে মান্য হয়। সুতরাং $2p$ উপকক্ষপথে সর্বাধিক ছয়টি ইলেকট্রন থাকতে পারে। যেহেতু $p$ উপকক্ষপথে $l=1$, অতএব এই সংখ্যা $2(2l+1)$ এর সমান হয়। এইভাবে বিভিন্ন উপকক্ষপথে সম্ভাব্য ইলেকট্রন সংখ্যার হিসাব করা যায়।

উপরোক্ত আলোচনা থেকে বিভিন্ন পরমাণুর মধ্যে ইলেকট্রনগুলি কী ভাবে বিন্যস্ত থাকে তা নির্ণয় করা যায়। এখানে আমরা ধরে নেব যে পরমাণুর মোট ইলেকট্রন সংখ্যা এর পরমাণবিক সংখ্যা $(Z)$, অর্থাৎ পর্যায় সারণীতে পরমাণুটির ক্রমিক সংখ্যার সংগে সমান হয়।

পর্যায় সারণীর সর্বপ্রথমে থাকে হাইড্রোজেন, যার পরমাণুর মধ্যে একটি মাত্র ইলেকট্রন থাকে। এটি $1s$ কক্ষপথে থাকে। কারণ $n=1$, অর্থাৎ K খোলসটি পরমাণু কেন্দ্রকের নিকটতম। সেজন্য এর মধ্যে অবস্থিত ইলেকট্রন সর্বাপেক্ষা দৃঢ় সংবদ্ধ হয়। ফলে সেটির শক্তিও নূন্যতম হয়। বলবিদ্যা তত্ত্ব থেকে আমরা জানি যে প্রকৃতিতে সকল বস্তুই ন্যূনতম শক্তি সম্পন্ন অবস্থায় থাকতে চায়। ইলেকট্রনগুলিও এই সূত্র মেনে চলে। হাইড্রোজেনের ইলেকট্রনটিকে নির্দেশ করা যায় $1s^1$ চিহ্ন দ্বারা। পর্যায় সারণীর দ্বিতীয় মৌল হচ্ছে হিলিয়াম, যার পরমাণুতে দুটি ইলেকট্রন থাকে। যেহেতু $1s$ শক্তিস্তরে সর্বাধিক দুটি ইলেকট্রন থাকতে পারে, অতএব হিলিয়ামের পরমাণুতে দুটি ইলেকট্রনই এই শক্তিস্তরে অবস্থিত থাকে। এগুলিকে $1s^2$ চিহ্ন দ্বারা নির্দেশিত করা হয়।

হিলিয়ামে এসে $1s$ খোলসটি পূর্ণ হয়ে যায়। সেজন্য পর্যায় সারণীতে প্রথম পর্যায়ে (First Period) হাইড্রোজেন এবং হিলিয়াম এই দুটি মৌল থাকে।

দ্বিতীয় পর্যায় (Second Period) শুরু হয় $Z=3$, অর্থাৎ লিথিয়াম মৌল থেকে। এটি একটি ক্ষারীয় মৌল। এর পরমাণুতে তিনটি ইলেকট্রনের মধ্যে প্রথম দুটি থাকে K খোলসের মধ্যে $1s$ উপকক্ষপথে। তৃতীয় ইলেকট্রনটি L খোলসের মধ্যে $2s$ উপকক্ষপথে থাকে। লিথিয়ামের ইলেকট্রন বিন্যাস $1s^2\ 2s^1$, এইভাবে লেখা হয়।

পরবর্তী মৌল বেরিলিয়ামের পরমাণবিক সংখ্যা হচ্ছে $Z=4$ ; এর

চারটি ইলেকট্রনের মধ্যে প্রথম দুটি থাকে $1s$ উপকক্ষপথে, বাকী দুটি থাকে $2s$ উপকক্ষপথে। বেরিলিয়ামের ইলেকট্রন বিন্যাস $1s^2\ 2s^2$, এইভাবে লেখা যায়। বেরিলিয়ামে এসে $2s$ উপকক্ষপথটি পূর্ণ হয়।

পরবর্তী মৌল বোরনে $(Z=5)$ পাঁচটি ইলেকট্রন থাকে। এদের মধ্যে প্রথম চারটির বিন্যাস বেরিলিয়াম মৌলের ইলেকট্রন বিন্যাসের অনুরূপ; পঞ্চমটি $2p$ উপকক্ষপথে সন্নিবিষ্ট হয়। বোরনের ইলেকট্রন বিন্যাস $1s^2\ 2s^2\ 2p^1$ এইভাবে লেখা যায়। এরপর $Z=6,\ 7,\ 8,\ 9,\ 10$ পরমাণবিক সংখ্যা সম্পন্ন কার্বন, নাইট্রোজেন, অক্সিজেন, ক্লোরিন এবং নীয়নের ক্ষেত্রে অতিরিক্ত ইলেকট্রনগুলি সব $2p$ উপকক্ষপথে স্থাপিত হতে পারে। $Z=10$ অর্থাৎ নীয়নে এসে $2p$ উপকক্ষপথ ছয়টি ইলেকট্রন দ্বারা পূর্ণ হয়ে যায়। L খোলসও এই সংগে পূর্ণ হয়ে যায় এবং দ্বিতীয় পর্যায় শেষ হয়। নীয়নের ইলেকট্রন বিন্যাসকে $1s^2\ 2s^2\ 2p^6$, এইভাবে লেখা যায়।

এরপরে তৃতীয় পর্যায় (Third Period) শুরু হয় দ্বিতীয় ক্ষারীয় মৌল সোডিয়াম $(Z=11)$ থেকে। এক্ষেত্রে একাদশতম ইলেকট্রনটি M খোলসে $(n=3)$ স্থাপিত হতে পারে। প্রকৃতপক্ষে এই ইলেকট্রনটি $3s$ উপকক্ষপথে সন্নিবিষ্ট হয়। সোডিয়ামের ইলেকট্রন বিন্যাসকে $1s^2\ 2s^2\ 2p^6\ 3s^1$, এইভাবে লেখা যায়। পর্যায় সারণীতে সোডিয়াম লিথিয়ামের সংগে একই স্তম্ভে এবং ঠিক লিথিয়ামের নীচেই অবস্থিত থাকে। লিথিয়ামের বহিস্থ ইলেকট্রন হচ্ছে $2s^1$, আর সোডিয়ামের বহিস্থ ইলেকট্রন হচ্ছে $3s^1$। বহিস্থ ইলেকট্রন বিন্যাসের এই সাদৃশ্যই এই দুটি মৌলের ভৌত ও রাসায়নিক সমধর্মিতার কারণ। এর থেকে প্রতীয়মান হয় যে পরমাণুর মধ্যে সংযোজী ইলেকট্রনের অবস্থানই পরমাণুর ভৌত ও রাসায়নিক গুণাবলী নির্ধারিত করে।

পরবর্তী মৌল ম্যাগনেসিয়মে $(Z=12)$ দ্বাদশতম ইলেকট্রনটিও $3s$ উপকক্ষপথে স্থাপিত হয়। এর ইলেকট্রন বিন্যাসকে $1s^2\ 2s^2\ 2p^6\ 3s^2$, এইভাবে লেখা যায়। স্পষ্টতঃ বেরিলিয়ামের $(Z=4)$ সংগে এর বহিস্থ ইলেকট্রন বিন্যাসের সাদৃশ্য আছে। উভয় ক্ষেত্রেই সংযোজী ইলেকট্রন দুটি $s$ উপকক্ষপথে থাকে। এই ক্ষারীয় মৃত্তিকা (Alkaline Earth) মৌলগুলি পর্যায় সারণীর দ্বিতীয় স্তম্ভে সন্নিবিষ্ট থাকে। এদের রাসায়নিক ও ভৌত ধর্মাবলীর মধ্যে যথেষ্ট সাদৃশ্য আছে।

## সারণী 5·3

| মৌল | $Z$ | K ($n=1$) | L ($n=2$) | | M ($n=3$) | | | N ($n=4$) | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | $l=0$ (1$s$) | $l=0$ (2$s$) | 1 (2$p$) | $l=0$ (3$s$) | 1 (3$p$) | (3$d$) | $l=0$ (4$s$) | 1 (4$p$) |
| H | 1 | 1 | | | | | | | |
| He | 2 | 2 | | | | | | | |
| Li | 3 | 2 | 1 | | | | | | |
| Be | 4 | 2 | 2 | | | | | | |
| B | 5 | 2 | 2 | 1 | | | | | |
| C | 6 | 2 | 2 | 2 | | | | | |
| N | 7 | 2 | 2 | 3 | | | | | |
| O | 8 | 2 | 2 | 4 | | | | | |
| F | 9 | 2 | 2 | 5 | | | | | |
| Ne | 10 | 2 | 2 | 6 | | | | | |
| Na | 11 | নীয়নের ইলেকট্রন বিন্যাসের অনুরূপ | | | 1 | | | | |
| Mg | 12 | | | | 2 | | | | |
| Al | 13 | | | | 2 | 1 | | | |
| Si | 14 | | | | 2 | 2 | | | |
| P | 15 | | | | 2 | 3 | | | |
| S | 16 | | | | 2 | 4 | | | |
| Cl | 17 | | | | 2 | 5 | | | |
| A | 18 | | | | 2 | 6 | | | |
| K | 19 | আর্গনের ইলেকট্রন বিন্যাসের অনুরূপ | | | | | .. | 1 | |
| Ca | 20 | | | | | | ... | 2 | |
| Sc | 21 | | | | | | 1 | 2 | |
| Ti | 22 | | | | | | 2 | 2 | |
| V | 23 | | | | | | 3 | 2 | |
| Cr | 24 | | | | | | 5 | 1 | |
| Mn | 25 | | | | | | 5 | 2 | |
| Fe | 26 | | | | | | 6 | 2 | |
| Co | 27 | | | | | | 7 | 2 | |
| Ni | 28 | | | | | | 8 | 2 | |
| Cu | 29 | | | | | | 10 | 1 | |
| Zn | 30 | | | | | | 10 | 2 | |
| Ga | 31 | | | | | | 10 | 2 | 1 |
| Ge | 32 | | | | | | 10 | 2 | 2 |
| As | 33 | | | | | | 10 | 2 | 3 |
| Si | 34 | | | | | | 10 | 2 | 4 |
| Br | 35 | | | | | | 10 | 2 | 5 |
| Kr | 36 | | | | | | 10 | 2 | 6 |

**সারণী 5·3**

| মৌল | Z | আভ্যন্তরীণ ইলেকট্রন বিন্যাস | N ($n=4$) | | O ($n=5$) | | | P ($n=6$) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | $l=2$ (4$d$) | 3 (4$f$) | $l=0$ (5$s$) | 1 (5$p$) | 2 (5$d$) | $l=0$ (6$s$) |
| Rb | 37 | ক্রিপটনের ইলেকট্রন বিন্যাসের অনুরূপ | .... | .... | 1 | | | |
| Sr | 38 | | .... | .... | 2 | | | |
| Y | 39 | | 1 | .... | 2 | | | |
| Zr | 40 | | 2 | .... | 2 | | | |
| Nb | 41 | | 4 | .... | 1 | | | |
| Mo | 42 | | 5 | ... | 1 | | | |
| Tc | 43 | | 6 | .... | 1 | | | |
| Ru | 44 | | 7 | .... | 1 | | | |
| Rh | 45 | | 8 | .... | 1 | | | |
| Pd | 46 | | 10 | .... | .... | | | |
| Ag | 47 | প্যালাডিয়ামের ইলেকট্রন বিন্যাসের অনুরূপ | | .... | 1 | | | |
| Cd | 48 | | | .... | 2 | | | |
| In | 49 | | | .... | 2 | 1 | | |
| Sn | 50 | | | .... | 2 | 2 | | |
| Sb | 51 | | | .... | 2 | 3 | | |
| Te | 52 | | | .... | 2 | 4 | | |
| In | 53 | | | .... | 2 | 5 | | |
| Xe | 54 | | | .... | 2 | 6 | | |
| Cs | 55 | প্যালাডিয়ামের ইলেকট্রন বিন্যাসের অনুরূপ | | .... | 2 | 6 | | 1 |
| Ba | 56 | | | ... | 2 | 6 | | 2 |
| La | 57 | | | | 2 | 6 | 1 | 2 |
| Ce | 58 | | | 2 | 2 | 6 | .... | 2 |
| Pr | 59 | | | 3 | 2 | 6 | .... | 2 |
| Nd | 60 | | | 4 | 2 | 6 | .... | 2 |
| Pm | 61 | | | 5 | 2 | 6 | .... | 2 |
| Sm | 62 | | | 6 | 2 | 6 | .... | 2 |
| Eu | 63 | | | 7 | 2 | 6 | .... | 2 |
| Gd | 64 | | | 7 | 2 | 6 | 1 | 2 |
| Tb | 65 | | | 9 | 2 | 6 | .... | 2 |
| Dy | 66 | | | 10 | 2 | 6 | .... | 2 |
| Ho | 67 | | | 11 | 2 | 6 | .... | 2 |
| Er | 68 | | | 12 | 2 | 6 | .... | 2 |
| Tm | 69 | | | 13 | 2 | 6 | .... | 2 |
| Yb | 70 | | | 14 | 2 | 6 | .... | 2 |
| Lu | 71 | | | 14 | 2 | 6 | 1 | 2 |

## সারণী 5·3

| মৌল | $Z$ | আভ্যন্তরীণ ইলেকট্রন বিন্যাস | O $(n=5)$ | | P $(n=6)$ | | | Q $(n=7)$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | $l=2$ $(5d)$ | 3 $(5f)$ | $l=0$ $(6s)$ | 1 $(6p)$ | 2 $(6d)$ | $l=0$ $(7s)$ |
| Hf | 72 | $1s$ থেকে $5p$ পর্যন্ত খোলসগুলিতে মোট 68টি ইলেকট্রন থাকে। | 2 | .... | 2 | | | |
| Ta | 73 | | 3 | .... | 2 | | | |
| W | 74 | | 4 | .... | 2 | | | |
| Re | 75 | | 5 | .... | 2 | | | |
| Os | 76 | | 6 | .... | 2 | | | |
| Ir | 77 | | 9 | .... | .... | | | |
| Pt | 78 | | 9 | .... | 1 | | | |
| Au | 79 | $1s$ থেকে $5d$ পর্যন্ত খোলসগুলিতে মোট 78টি ইলেকট্রন থাকে | | .... | 1 | | | |
| Hg | 80 | | | .... | 2 | | | |
| Tl | 81 | | | .... | 2 | 1 | | |
| Pb | 82 | | | .... | 2 | 2 | | |
| Bi | 83 | | | .... | 2 | 3 | | |
| Po | 84 | | | .... | 2 | 4 | | |
| At | 85 | | | .... | 2 | 5 | | |
| Rn | 86 | | | .... | 2 | 6 | | |
| Fr | 87 | | | .... | 2 | 6 | .... | 1 |
| Ra | 88 | | | .... | 2 | 6 | .... | 2 |
| Ac | 89 | | | .... | 2 | 6 | 1 | 2 |
| Th | 90 | | | .... | 2 | 6 | 2 | 2 |
| Pa | 91 | | | 2 | 2 | 6 | 1 | 2 |
| U | 92 | | | 3 | 2 | 6 | 1 | 2 |
| Np | 93 | | | 4 | 2 | 6 | 1 | 2 |
| Pu | 94 | | | 6 | 2 | 6 | .... | 2 |
| Am | 95 | | | 7 | 2 | 6 | .... | 2 |
| Cm | 96 | | | 7 | 2 | 6 | 1 | 2 |
| Bk | 97 | | | 8 | 2 | 6 | 1 | 2 |
| Cf | 98 | | | 10 | 2 | 6 | .... | 2 |
| E | 99 | | | 11 | 2 | 6 | .... | 2 |
| Fm | 100 | | | 12 | 2 | 6 | .... | 2 |
| Mv | 101 | | | 13 | 2 | 6 | .... | 2 |
| No | 102 | | | 14 | 2 | 6 | .... | 2 |
| Lw | 103 | | | 14 | 2 | 6 | 1 | 2 |
| Ha | 104 | | | 14 | 2 | 6 | 2 | 2 |

(5·3) সারণীতে বিভিন্ন মৌলের ইলেকট্রন বিন্যাস দেখান হয়েছে। মৌলগুলিকে তাদের পরমাণবিক সংখ্যা অনুযায়ী সাজান হয়েছে।

উক্ত সারণী থেকে দেখা যায় যে হিলিয়ামে K-খোলস পূর্ণ হয়ে যায়, এবং নীয়ন ($Z=10$), আর্গন ($Z=18$), ক্রিপ্‌টন ($Z=36$), জেনন ($Z=54$) এবং রেডন ($Z=86$)—এই কয়টি মৌলের ক্ষেত্রে যথাক্রমে L, M, N, O এবং P খোলসগুলির $l=1$ বা $p$ উপকক্ষপথসমূহ পূর্ণ হয়ে যায়। কোন একটি বহিস্থ উপকক্ষপথ যখন ইলেকট্রনে পূর্ণ হয়ে যায়, তখন পরমাণুর ইলেকট্রনগুলি খুব দৃঢ় সংবদ্ধ হয়। ফলে এইসব পরমাণুর পক্ষে অন্য একটি ইলেকট্রন গ্রহণ করা বা এর মধ্যে বর্তমান কোন ইলেকট্রনকে বর্জন করা শক্ত হয়। রাসায়নিক বিক্রিয়ায় পরমাণুগুলির মধ্যে বহিস্থ কক্ষপথের ইলেকট্রন বিনিময় ঘটে। স্পষ্টত He, Ne, A, Kr, Xe বা Rn, এই সব মৌলের পরমাণুগুলির পক্ষে এইরূপ ইলেকট্রন বিনিময় করা খুব শক্ত। সেই কারণে এরা অন্য কোন মৌলের সংগে সহজে বিক্রিয়া করে না। এদের বলা হয় উদাসী গ্যাস (Inert Gas)।

এদের ঠিক পরবর্তী মৌলগুলিতে পূর্ণ $s$ বা $p$-উপকক্ষপথের ঠিক বাইরে যথাক্রমে L, M, N, O এবং P খোলসের $l=0$ বা $s$ উপকক্ষপথে একটি করে সংযোজী (Valence) ইলেকট্রন থাকে। এগুলির প্রত্যেকটি হচ্ছে ক্ষারীয় মৌল। পূর্বোল্লিখিত Li ($Z=3$) ও Na ($Z=11$) ছাড়া এদের মধ্যে আছে K ($Z=19$), Rb ($Z=37$) Cs ($Z=55$) এবং Fr ($Z=87$)। এদের তড়িৎ-ধনাত্মকতা (Electro Positivity) খুব উচ্চ। রাসায়নিক বিক্রিয়ায় এরা সহজেই শিথিলভাবে আবদ্ধ সংযোজী $s$ ইলেকট্রনটিকে অন্য কোন তড়িৎ-ঋণাত্মক (Electro Negative) মৌলের সংগে বিনিময় করতে পারে। এদের সবগুলি হচ্ছে একযোজী মৌল। এদের রাসায়নিক ধর্মাবলী একই ধরনের এবং এদের সকলেরই বর্ণালীরেখাগুলির দ্বৈত গঠন (Doublet Structure) দেখতে পাওয়া যায়।

অনুরূপে দ্বিতীয় স্তম্ভের মৌলগুলির পরমাণুর মধ্যে বাইরের $l=0$, অর্থাৎ $s$ উপকক্ষপথে দুটি করে ইলেকট্রন থাকে। এগুলি হচ্ছে ক্ষারীয় মৃত্তিকা (Alkaline Earth) শ্রেণীর মৌল। পূর্বোল্লিখিত Be ($Z=4$) এবং Mg ($Z=12$) ছাড়া এদের মধ্যে আছে Ca ($Z=20$), Sr ($Z=38$), Ba ($Z=56$) এবং Ra ($Z=88$)। এদের রাসায়নিক ধর্ম সমপ্রকার এবং এগুলি সব দ্বিযোজী মৌল।

এর পরের স্তম্ভগুলির মৌলসমূহের পরমাণুগুলির বাইরের $s$ এবং $p$ উপকক্ষপথ মিলিয়ে যথাক্রমে তিন, চার, পাঁচ, ছয় এবং সাতটি করে ইলেকট্রন থাকে। যে কোন পর্যায়ের বিভিন্ন স্তম্ভে অবস্থিত মৌলসমূহের পরমাণুগুলির বহিস্থ কক্ষপথের ইলেকট্রন সংখ্যার পার্থক্যের জন্য এদের রাসায়নিক ধর্মাবলী ভিন্ন হয়। পরপর স্তম্ভে এদের যোজ্যতা এক একক করে বৃদ্ধি পায়। যে কোন স্তম্ভে অবস্থিত বিভিন্ন পর্যায়ের মৌলগুলির পরমাণুসমূহের বহিস্থ ইলেকট্রন বিন্যাসের সাদৃশ্যের জন্য তাদের রাসায়নিক ধর্মের মধ্যে সাদৃশ্য থাকে এবং যোজ্যতা সমান হয়।

$Z=9$ ( ফ্লোরিন ), $Z=17$ ( ক্লোরিন ), $Z=35$ ( ব্রোমিন ), $Z=53$ ( আয়োডিন ) এবং $Z=85$ ( অ্যাস্টাটিন ), এই হ্যালোজেন মৌলগুলির বহিস্থ $2p$, $3p$, $4p$, $5p$ এবং $6p$ উপকক্ষপথে পাঁচটি করে ইলেকট্রন থাকে। অর্থাৎ উদাসী গ্যাসের ইলেকট্রন বিন্যাসের মত উক্ত উপকক্ষপথগুলিকে পূর্ণ করার জন্য আর একটি করে ইলেকট্রনের প্রয়োজন হয়। সেইজন্য এগুলির তড়িৎ-ঋণাত্মকতা খুব উচ্চ হয়। রাসায়নিক বিক্রিয়ার সময় তড়িৎ ধনাত্মক মৌল থেকে সহজেই একটি ইলেকট্রন সংগ্রহ করে এরা $p$ উপকক্ষপথ পূর্ণ করে ফেলতে পারে। এদের সকলের রাসায়নিক ধর্ম একই প্রকার, এবং পর্যায় সারণীতে সপ্তম স্তম্ভে এদের স্থান ( A-4 পরিশিষ্ট দ্রষ্টব্য )।

আর্গন গ্যাসের ($Z=18$) পরমাণুতে $3p$ উপকক্ষপথটি পূর্ণ হয়। আশা করা যেতে পারে যে পরবর্তী মৌলে, অর্থাৎ পটাসিয়ামে ($Z=19$), ঊনবিংশতিতম ইলেকট্রনটি $3d$ উপকক্ষপথে স্থাপিত হতে পারে। প্রকৃতপক্ষে কিন্তু সেরূপ হয় না। উক্ত ইলেকট্রনটি স্থাপিত হয় $4s$ উপকক্ষপথে। তাত্ত্বিক বিচারে দেখা যায় যে এক্ষেত্রে $3d$ অপেক্ষা $4s$ উপকক্ষপথে ইলেকট্রনটি বেশী দৃঢ়ভাবে সংবদ্ধ হয়। $Z=20$ অর্থাৎ ক্যালসিয়ামেও বিংশতিতম ইলেকট্রনটি $4s$ উপকক্ষপথে থাকে। তারপরে Sc ($Z=21$) থেকে Zn ($Z=30$) পর্যন্ত মৌলে অতিরিক্ত ইলেকট্রনগুলি $4s$ উপকক্ষপথের অভ্যন্তরে অবস্থিত $3d$ উপকক্ষপথে পরপর স্থাপিত হয়। দশটি ইলেকট্রনের দ্বারা এই উপকক্ষপথ পূর্ণ হয়। যেহেতু এদের বহিস্থ ইলেকট্রন বিন্যাস প্রায় অপরিবর্তিত থাকে, সেজন্য Sc ($Z=21$) থেকে Ni ($Z=28$) পর্যন্ত মৌলগুলির যোজ্যতার ক্রমিক বৃদ্ধি হয় না এবং অন্য কোন মৌলের সংগে এদের রাসায়নিক সাদৃশ্যও থাকে না। এদের বলা হয় 'প্রথম সংক্রমণ শ্রেণীর মৌল' (First Transition Group of Elements)।

অনুরূপভাবে $Z=36$ অর্থাৎ ক্রিপ্‌টনের পর, প্রথম দুটি ইলেকট্রন $5s$ উপকক্ষপথে স্থাপিত হয়। তারপর Y ($Z=39$) থেকে Pd ($Z=46$) পর্যন্ত অভ্যন্তরস্থ $4d$ উপকক্ষপথটি ক্রমশঃ পূর্ণ হতে থাকে। সেইজন্য এইগুলিকে 'দ্বিতীয় সংক্রমণ শ্রেণীর মৌল' বলা হয়।

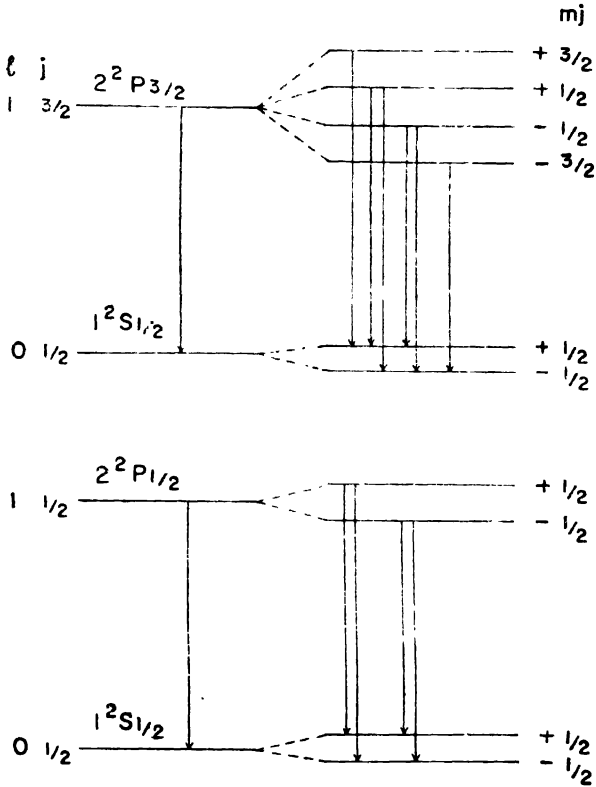
Ag ($Z=47$) থেকে আবার $n=5$ বা O খোলসটি পূর্ণ হতে শুরু হয়। $Z=54$ অর্থাৎ জেননে (Xe) এসে $5p$ উপকক্ষপথটি পূর্ণ হয়। পরবর্তী দুটি মৌলে অতিরিক্ত ইলেকট্রন দুটি P খোলসের $6s$ উপকক্ষপথে স্থাপিত হয়। এরপর Ce ($Z=58$) থেকে আরম্ভ করে অভ্যন্তরস্থ $4f$ উপকক্ষপথটি পূর্ণ হতে থাকে। চৌদ্দটি ইলেকট্রন দ্বারা এই উপকক্ষপথটি পূর্ণ হয়। Ce ($Z=58$) থেকে Lu ($Z=71$) পর্যন্ত যে সব মৌলে অভ্যন্তরস্থ $4f$ উপকক্ষপথ এই ভাবে পূর্ণ হতে থাকে সেগুলিকে 'বিরল মৃত্তিকা' (Rare Earth) মৌল বলা হয়। বহিস্থ ইলেকট্রন বিন্যাস অপরিবর্তিত থাকার জন্য এই মৌলগুলির রাসায়নিক ধর্মের মধ্যে অদ্ভুত রকমের সাদৃশ্য দেখা যায়।

এরপরে 'তৃতীয় সংক্রমণ শ্রেণীভুক্ত' Hf ($Z=72$) থেকে Pt ($Z=78$) পর্যন্ত মৌলে অতিরিক্ত ইলেকট্রনগুলি ভিতরের $5d$ উপকক্ষ পথে যায়। আবার 'অ্যাকটিনাইড শ্রেণীভুক্ত' Pa ($Z=91$) থেকে Lw ($Z=103$) পর্যন্ত মৌলে ভিতরের $5f$ উপকক্ষপথ পূর্ণ হয়। অর্থাৎ এগুলি দ্বিতীয় একটি 'বিরল মৃত্তিকা শ্রেণী' উৎপন্ন করে।

## 5·5 : অস্বাভাবিক জীমান ক্রিয়া

(5·1) অনুচ্ছেদে এই ক্রিয়ার উল্লেখ করা হয়েছে। ইলেকট্রনের ঘূর্ণন বিবেচনা করলে, প্রযুক্ত চৌম্বক ক্ষেত্রে $\boldsymbol{l}$ ভেক্টরের বদলে মোট কৌণিক ভরবেগ নির্দেশক $\boldsymbol{j}$ ভেক্টরটি চৌম্বক ক্ষেত্রকে বেষ্টন করে অয়নচলন গতিতে আবর্তিত হতে থাকে। চৌম্বক ক্ষেত্রের সাপেক্ষে $\boldsymbol{j}$ ভেক্টরটির $(2j+1)$ সংখ্যক দিগ্‌বিন্যাস সম্ভব এবং এই সব বিভিন্ন দিগ্‌বিন্যাসগুলি মোট চৌম্বক কোয়ানটাম সংখ্যা $m_j$ দ্বারা নির্ধারিত হয়। $m_j=j,\ j-1, j-2, \cdots -j$, এই মানগুলি সম্ভব। চৌম্বক ক্ষেত্রে নির্দিষ্ট $n, l$ ও $j$ সম্পন্ন শক্তিস্তরগুলি $(2j+1)$ সংখ্যক কাছাকাছি অবস্থিত শক্তিস্তরে বিভাজিত হয়ে যায়। এইরূপ দুটি বিভাজিত স্তরের শক্তির পার্থক্য কিন্তু $j$ সংখ্যাটির মানের উপর নির্ভর করে। ফলে যে দুটি শক্তিস্তরের মধ্যে সংক্রমণের ফলে কোন একটি বর্ণালীরেখার উদ্ভব হয়, চৌম্বকক্ষেত্রে সেই স্তর দুটির বিভাজনের পরিমাণ পৃথক

হয়। (5·8) চিত্রে সোডিয়ামের দুটি D-রেখার ক্ষেত্রে শক্তিস্তরগুলির এইরূপ বিভাজন দেখান হয়েছে। এদের মধ্যে সংক্রমণ নির্ধারিত হয় নিম্নলিখিত নির্বাচন সূত্র দ্বারা

$$\Delta m_j = 0, \ \pm 1 \tag{5·24}$$

চিত্র 5·8

সোডিয়াম $D_2$ ( উপরে ) ও $D_1$ ( নীচে ) রেখার ক্ষেত্রে অস্বাভাবিক জীমান ক্রিয়ার উৎপত্তি। দুটি চিত্রেই ডান দিকে দেখান উপরের ও নীচের স্তরের চৌম্বক বিভাজনের পার্থক্য লক্ষণীয়।

(5·8) চিত্রে এই সংক্রমণগুলি দেখান হয়েছে। উক্ত চিত্র থেকে দেখা যায় যে $D_1$ রেখা চারটি রেখায় বিভাজিত হয়, আর $D_2$ রেখা ছয়টি রেখায় বিভাজিত হয়।

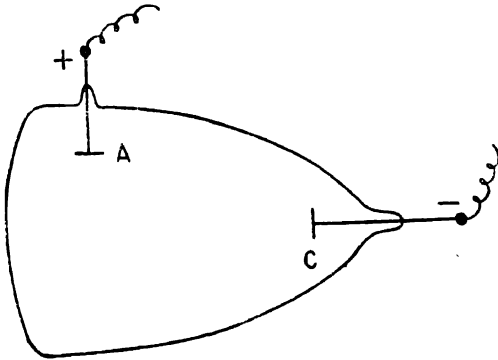
এখানে উল্লেখযোগ্য যে স্বাভাবিক জীমান ক্রিয়ার তত্ত্বে উপরের এবং নীচের শক্তিস্তরগুলির বিভাজনের পরিমাণ সমান হয়। ফলে উক্ত তত্ত্ব অনুসারে সব বর্ণালীরেখাই মাত্র তিনটি রেখায় বিভাজিত হয়ে যায়। আমরা পূর্বেই দেখেছি ( 5·1 অনুচ্ছেদে দ্রষ্টব্য ) যে প্রকৃতপক্ষে কয়েক সহস্র গাওস পর্যন্ত চৌম্বক ক্ষেত্রের প্রভাবে বেশীরভাগ ক্ষেত্রেই বিভাজিত রেখার সংখ্যা তিনের অধিক হয়। অর্থাৎ তথাকথিত অস্বাভাবিক জীমান ক্রিয়াই (Anomalous Zeeman Effect) প্রকৃতপক্ষে স্বাভাবিক। অবশ্য খুব উচ্চ চৌম্বক ক্ষেত্র ( 10,000 গাওস বা ততোধিক ) প্রয়োগ করলে বর্ণালীরেখাগুলিকে তিনটি মাত্র রেখায় বিভাজিত হতে দেখা যায়। অর্থাৎ স্বাভাবিক জীমান ক্রিয়া তত্ত্বের সংগে সংগতিপূর্ণ বিভাজন ঘটে। এইরূপ বিভাজনকে 'পাশেন-বাক ক্রিয়া' (Paschen Back Effect) বলে। এই অবস্থায় কক্ষীয় ও ঘূর্ণন চৌম্বক ভ্রামকদ্বয়ের চৌম্বক সংযোজন (Magnetic Coupling) বিনষ্ট হয় এবং এরা চৌম্বক ক্ষেত্রকে বেষ্টন করে স্বতন্ত্রভাবে আবর্তন করতে থাকে। যে কোন শক্তিস্তরের চৌম্বক ক্ষেত্রজ বিভাজন এক্ষেত্রে ($m_l + 2m_s$) সংখ্যাটির উপরে নির্ভর করে। বিভাজনের প্রকৃতি স্বাভাবিক জীমান ক্রিয়ার অনুরূপ হয়।

## ষষ্ঠ পরিচ্ছেদ

# একস্-রশ্মি এবং কেলাস গঠন নির্ণয়

### 6·1 : X-রশ্মির আবিষ্কার

১৮৯৫ সালে জার্মান বিজ্ঞানী রন্টগেন (W. C. Röntgen) সদ্য আবিষ্কৃত ক্যাথোড রশ্মি নিয়ে গবেষণা করতে গিয়ে সম্পূর্ণ অপ্রত্যাশিত ভাবে X-রশ্মি আবিষ্কার করেন। রন্টগেন একটি খুব নিম্ন বায়ুচাপে রাখা কাঁচ নির্মিত আবদ্ধ আধারের ভিতরকার ক্যাথোড ও অ্যানোডের মধ্যে একটি বড় আবেশ কুণ্ডলীর (Induction Coil) সাহায্যে উচ্চ বিভব প্রভেদ ( প্রায় 40,000 ভোল্ট ) প্রয়োগ করেন। তাঁর ব্যবহৃত কাঁচ নির্মিত আধারের আকৃতি (6·1) চিত্রে দেখান হয়েছে। আধারের এক প্রান্তে ক্যাথোড C এবং পাশের দিকে অ্যানোড A অবস্থিত থাকে। আধারটিকে একটি কৃষ্ণবর্ণ

চিত্র 6·1

রন্‌ট্‌গেনের পরীক্ষা ব্যবস্থা।

কার্ড-বোর্ড দ্বারা সম্পূর্ণ আচ্ছাদিত করে রাখা হয়, যাতে এর ভিতর থেকে দৃশ্যমান বা অতিবেগনী আলোক বাইরে আসতে না পারে। এই অবস্থায় আধারটিকে অন্ধকার কক্ষে রেখে আবেশ কুণ্ডলী চালিত করে একটি বেরিয়াম-প্ল্যাটিনো সায়ানাইড লিপ্ত কাগজের পর্দা তার কাছে ধরলে দেখা যায় যে কাগজটি উজ্জ্বল প্রতিপ্রভ (Fluorescent) আলোকে উদ্‌ভাসিত হয়ে ওঠে।

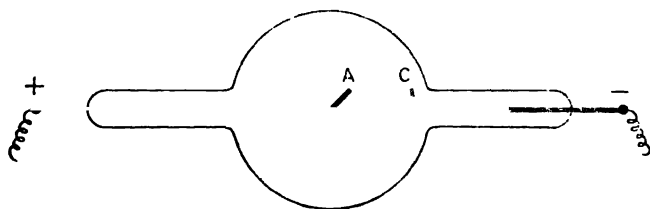
আধার থেকে দুই মিটার দূরেও এই প্রতিপ্রভা দৃষ্ট হয়। স্পষ্টতঃ এই প্রতিপ্রভার উৎপাদক আধারের ভিতরকার ক্যাথোড থেকে নিঃসৃত ক্যাথোড রশ্মি হতে পারে না। কারণ ক্যাথোড রশ্মির পক্ষে আধারের পুরু কাঁচ গাত্র ভেদ করে বাতাসের ভিতর দিয়ে দুই মিটার দূর পর্যন্ত যাওয়া অসম্ভব। তাদের ভেদ্যতা (Penetrability) অত বেশী হয় না। কাজেই রন্‌ট্‌গেন সিদ্ধান্ত করেন যে আধারের ভিতর থেকে কোন নূতন ধরনের খুব বেশী ভেদ্যতা সম্পন্ন রশ্মি নির্গত হয়। তিনি লক্ষ্য করেন যে আধারের গায়ে যেখানে ক্যাথোড রশ্মিগুলি আপতিত হয়, নূতন রশ্মি প্রধানতঃ সেই অঞ্চল থেকেই নিঃসৃত হয়। তিনি নব আবিষ্কৃত রশ্মির নাম দেন 'এক্‌স্ রশ্মি' (X-রশ্মি)। পরবর্তী যুগে অনেকে এই রশ্মিকে 'রন্‌ট্‌গেন রশ্মি' নামে অভিহিত করেন। কিন্তু 'X-রশ্মি' নামটিই বেশী প্রচলিত।

রন্‌ট্‌গেন লক্ষ্য করেন যে অনেক বস্তু, যা সাধারণ আলোকে বা অতিবেগনী আলোকে অনচ্ছ তা এই নূতন রশ্মির কাছে স্বচ্ছ। এই স্বচ্ছতার পরিমাণ বিভিন্ন বস্তুর ক্ষেত্রে বিভিন্ন। যেমন কাগজ প্রায় সম্পূর্ণ স্বচ্ছ। রন্‌ট্‌গেন লক্ষ করেন যে X-রশ্মি প্রায় এক হাজার পাতার একটি পুস্তক সহজেই ভেদ করে যেতে পারে ; পুস্তকের অপরদিকে নির্গত রশ্মির তীব্রতা (Intensity) খুব বেশী হ্রাস পায় না। পাতলা একটি টিনের পাত, দুই তিন সেণ্টিমিটার পুরু কাঠের তক্তা, এই সব ভেদ করে X-রশ্মি সহজেই নির্গত হয়ে আসে। প্রায় 15 মিলিমিটার পুরু অ্যালুমিনিয়ামের চাদর X-রশ্মির তীব্রতা অনেকটা কমিয়ে দিলেও একে সম্পূর্ণ শোষণ করতে পারে না। অপরপক্ষে সীসা, সোনা প্রভৃতি উচ্চ পরমাণবিক সংখ্যা ($Z$) সম্পন্ন পদার্থের মধ্যে X-রশ্মি সহজেই শোষিত হয়।

রন্‌ট্‌গেন লক্ষ্য করেন যে X-রশ্মি প্রাণীদেহের ত্বক ও মাংস সহজেই ভেদ করে যায়, কিন্তু হাড় সহজে ভেদ করতে পারে না। ফলে রশ্মিপথের উপরে প্রাণীদেহের কোন অংশ, যথা আমাদের হাত রাখলে হাতের ভিতরকার হাড়ের ছায়া প্রতিপ্রভ পর্দার উপর দেখা যায়। X-রশ্মির এই ভেদ্যতা গুণের জন্য আবিষ্কারের কয়েক মাসের মধ্যেই ইউরোপের বিভিন্ন হাসপাতালে নানা প্রকার অস্ত্র চিকিৎসার ক্ষেত্রে এর ব্যবহারিক প্রয়োগ শুরু হয়ে যায়। পদার্থ বিদ্যার ইতিহাসে এত অল্প সময়ের মধ্যে কোন মৌলিক আবিষ্কারের এইরূপ ব্যবহারিক প্রয়োগের দৃষ্টান্ত খুবই বিরল।

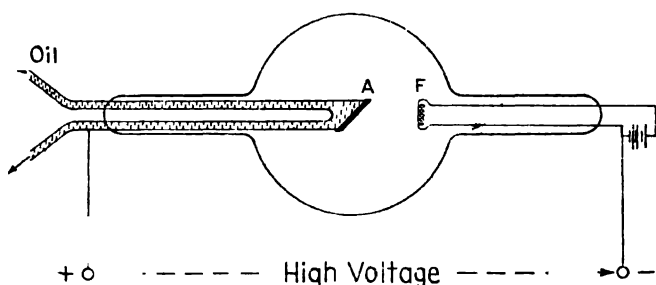
## 6·2 : X-রশ্মি উৎপাদন পদ্ধতি

প্রাথমিক পরীক্ষার পরে রন্ট্‌গেন X-রশ্মি উৎপাদনের জন্য একটি নূতন ধরনের মোক্ষণ নল উদ্ভাবিত করেন। কাঁচ নির্মিত এই আধারটি (6·2) চিত্রে দেখান হয়েছে। মোক্ষণ নলের বায়ুচাপ প্রায় $10^{-3}$ মিমি পারদ স্তম্ভের

চিত্র 6 2

রন্ট্‌গেন উদ্‌ভাবিত X-রশ্মি নল।

চাপের সমান রাখতে হয়। এর চেয়ে কম বায়ুচাপে এই জাতীয় নলে X-রশ্মি উৎপাদন করা শক্ত। উচ্চ বিভব প্রভেদের প্রভাবে $10^{-3}$ মিমি বায়ুচাপে নল মধ্যস্থ কিছু কিছু বাতাসের অণু আয়নিত হয়ে যায়, ফলে ধনাত্মক আণবিক আয়ন ও ঋণাত্মক ইলেকট্রনের সৃষ্টি হয়। ধনাত্মক আয়নগুলি C ক্যাথোডের উপর আপতিত হয়ে ইলেকট্রন নিঃসৃত করে। ইলেকট্রনগুলি উচ্চ বিভব প্রভেদের প্রভাবে আকৃষ্ট হয়ে সবেগে A অ্যানোডের উপর গিয়ে পড়ে এবং অ্যানোড থেকে X-রশ্মি নিঃসৃত করে। ক্যাথোড C সাধারণতঃ অবতল (Concave) আকৃতির হয়, যাতে নিঃসৃত ইলেকট্রনগুলি অ্যানোডে অবস্থিত ফোকাস বিন্দুর উপর আপতিত হতে পারে। ফলে খুব স্বল্প পরিসর স্থান থেকে X-রশ্মি নিঃসৃত হয়। C ক্যাথোড এবং A অ্যানোডের মধ্যে প্রায় 30,000 থেকে 50,000 ভোল্ট বিভব প্রভেদ প্রয়োগ করার প্রয়োজন হয়। এই জাতীয় X-রশ্মি আধারকে 'গ্যাস-নল' (Gas Tube) বলা হয়। এই ধরনের আধারে অ্যানোডের উপর আপতিত ইলেকট্রন প্রবাহ, প্রযুক্ত বিভব প্রভেদ এবং বায়ুচাপ পরস্পরকে প্রভাবিত করে।

অনেকদিন পর্যন্ত এইরূপ গ্যাস-নলই X-রশ্মির একমাত্র উৎস ছিল। পরে ১৯১৩ সালে কুলিজ (Coolidge) নামক আমেরিকান বিজ্ঞানী আর একটি নূতন ধরনের X-রশ্মি আধার উদ্ভাবিত করেন। একে বলা হয় 'কুলিজ নল'। (6·3) চিত্রে কুলিজ নলের নিদর্শন দেখান হয়েছে। এর

মধ্যে অবস্থিত F একটি টাংস্টেন তন্তু, যাকে তড়িৎ প্রবাহের সাহায্যে উত্তপ্ত করে তাপীয় ইলেকট্রন নিঃসরণের ব্যবস্থা করা হয়। এই ব্যবস্থায় নল মধ্যস্থ গ্যাস অণুগুলিকে আয়নিত করার প্রয়োজন হয় না। সুতরাং নলের ভিতরকার বায়ুচাপ গ্যাস-নল অপেক্ষা অনেক নিম্নমানে রাখা সম্ভব। সেইজন্য এই ধরনের নলে ক্যাথোড ও অ্যানোডের মধ্যে খুব উচ্চ বিভব প্রভেদ প্রয়োগ করা সম্ভব (100,000 ভোল্ট পর্যন্ত)। F তন্তুটি ক্যাথোডের

চিত্র 6·3

কুলিজ নল।

কাজ করে। আধুনিক কুলিজ নলে F তন্তুটি একটি অবতল ধাতব পাত্রের মধ্যে রাখা থাকে, যাতে নিঃসৃত তাপীয় ইলেকট্রনগুলি A অ্যানোডের উপর ফোকাসিত করা যায়। F এবং A এর মধ্যে ইচ্ছামত উচ্চ বিভব প্রভেদ প্রয়োগ করে ইলেকট্রনগুলির শক্তি পরিবর্তন করা যায়। আপতিত ইলেকট্রনের আঘাতে অ্যানোডটি খুব উত্তপ্ত হয়ে যায়। সেইজন্য এটি একটি ফাঁপা তামার নলের উপর বসান থাকে যাতে নলের মধ্য দিয়ে জল বা তেল প্রবাহিত করে একে ঠাণ্ডা করা যায়। তাছাড়া সাধারণতঃ টাংস্টেন জাতীয় উচ্চ গলনাংক সম্পন্ন ধাতু নির্মিত অ্যানোড ব্যবহার করা হয়। যাতে বেশী উত্তপ্ত হলেও অ্যানোডটি গলে না যেতে পারে। আধুনিক X-রশ্মি যন্ত্রে একটি আরোহী (Step up) ট্র্যান্সফর্মারের সাহায্যে সৃষ্ট উচ্চ পরিবর্তী (A.C.) বিভব F এবং A এর মধ্যে প্রয়োগ করা হয়। এই বিভবের যে অর্ধকম্পনকালে (Half Period) F এর সাপেক্ষে A ধনাত্মক হয়, কেবল তখনই ইলেকট্রনগুলি আকৃষ্ট হয়ে A আনোডের উপর আপতিত হয় এবং X-রশ্মি উৎপন্ন হয়। প্রয়োজন অনুযায়ী উপযুক্ত ব্যবস্থা অবলম্বন করে পরিবর্তী বিভবকে একমুখীকৃত (Rectify) করা হয় এবং আবেশক

(Inductor) ও ধারকের (Capacitor) সাহায্যে বিভবের মান ধ্রুবক করা হয়। আমেরিকান বিজ্ঞানী কার্স্ট্ (D. W. Kerst) কর্তৃক ১৯৪১ সালে উদ্ভাবিত বীটাট্রন (Betatron) নামক যন্ত্রের সাহায্যে বর্তমানে X-রশ্মি উৎপাদক ইলেকট্রনগুলিকে দশ কোটি ($10^8$) ইলেকট্রন ভোল্ট পর্যন্ত শক্তিশালী করা সম্ভব। এইরূপ অত্যুচ্চ শক্তিশালী ইলেকট্রনের সাহায্যে উৎপন্ন X-রশ্মির দ্বারা কেন্দ্রকের গঠন সম্পর্কিত নানারূপ পরীক্ষা অনুষ্ঠিত করা সম্ভব। বীটাট্রন যন্ত্রের কার্যপ্রণালী (18·7) অনুচ্ছেদে আলোচিত হবে।

### 6·3 : X-রশ্মির বৈশিষ্ট্য

রন্ট্গেন তাঁর প্রাথমিক পরীক্ষায় X-রশ্মির কতকগুলি গুরুত্বপূর্ণ বৈশিষ্ট্য লক্ষ্য করেন। পরে আরও অনেক বিজ্ঞানী রন্ট্গেনের প্রাপ্ত ফলাফলগুলির সত্যতা পরীক্ষা দ্বারা সমর্থন করেন। X-রশ্মির নিম্নলিখিত বৈশিষ্ট্যগুলি বিশেষ ভাবে উল্লেখযোগ্য ঃ

(ক) X-রশ্মি প্রায় সকল বস্তুকেই ভেদ করতে সমর্থ হয়। বিভিন্ন বস্তুর ক্ষেত্রে ভেদ্যতার পরিমাণ বিভিন্ন। সাধারণতঃ অধিক ঘনত্ব সম্পন্ন বস্তুর মধ্যে এদের ভেদ্যতা কম হয়। সাধারণ কাঁচ X-রশ্মির কাছে স্বচ্ছ, কিন্তু সীসা কাঁচ প্রায় সম্পূর্ণ অস্বচ্ছ। X-রশ্মির ভেদ্যতা সম্বন্ধে পূর্বেই বিশদভাবে আলোচনা করা হয়েছে।

(খ) বেরিয়াম প্ল্যাটিনো সায়ানাইড, ইউরেনিয়াম-কাঁচ, খনিজ লবণ, বিভিন্ন ক্যালসিয়াম যৌগ ইত্যাদি বস্তু X-রশ্মির প্রভাবে প্রতিপ্রভ আলোক নিঃসরণ করে।

(গ) X-রশ্মি ফোটোগ্রাফিক প্লেটকে কৃষ্ণায়িত (Blacken) করে। প্লেটের কৃষ্ণতার পরিমাণ আপতিত রশ্মির তীব্রতার উপর নির্ভর করে। কাজেই ফোটোগ্রাফিক পদ্ধতিতে X-রশ্মির তীব্রতা পরিমাপ করা যায়।

(ঘ) X-রশ্মি গ্যাসকে আয়নিত করে। আয়নন ক্ষমতা আপতিত রশ্মির তীব্রতার উপর নির্ভর করে। ফলে X-রশ্মির আয়নন ক্ষমতা নির্ণয় করে এর তীব্রতা পরিমাপ করা সম্ভব।

(ঙ) X-রশ্মি তড়িৎক্ষেত্র বা চৌম্বক ক্ষেত্র দ্বারা বিচ্যুত হয় না। এর থেকে প্রমাণিত হয় যে এই রশ্মি ক্যাথোড রশ্মি বা ধনাত্মক রশ্মির মত কোন আহিত কণিকার রশ্মি নয়।

(চ) X-রশ্মি সাধারণ আলোক রশ্মির ন্যায় সরল রেখায় চলে।

(ছ) যদিও রন্‌ট্‌গেন প্রভৃতি বিজ্ঞানীরা প্রথম যুগে X-রশ্মির প্রতিফলন বা প্রতিসরণ দেখতে পানিনি, পরবর্তী যুগে কিন্তু প্রমাণিত হয়েছে যে X-রশ্মি প্রতিফলিত হয় এবং প্রতিসৃতও হয়।

(জ) কেলাসিত (Crystalline) পদার্থ থেকে X-রশ্মির ব্যবর্তন (Diffraction) উৎপন্ন করা যায়। এ সম্বন্ধে পরে বিশদভাবে আলোচনা করা হবে। এই ধরনের ব্যবর্তন পরীক্ষার সাহায্যে X-রশ্মির তরঙ্গদৈর্ঘ্য মাপা যায়।

উপরে প্রদত্ত গুণাবলী থেকে প্রতীয়মান হয় যে এই রশ্মিগুলি সাধারণ দৃশ্যমান আলোক বা অতিবেগনী আলোকের ন্যায় এক প্রকার তড়িৎচুম্বকীয় তরঙ্গ। তফাৎ শুধু এই যে X-রশ্মির তরঙ্গদৈর্ঘ্য উপরোক্ত দুই প্রকার আলোকের তরঙ্গদৈর্ঘ্য অপেক্ষা অনেক ক্ষুদ্রতর হয়। উদাহরণস্বরূপ

দৃশ্যমান আলোকের তরঙ্গদৈর্ঘ্য ঃ প্রায় 4000 থেকে 8000 অ্যাংষ্ট্রম ;

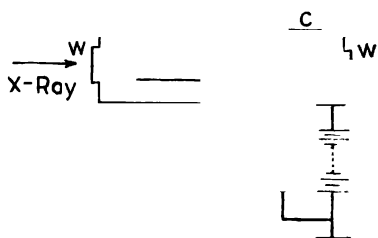
অতিবেগনী রশ্মির তরঙ্গদৈর্ঘ্য ঃ প্রায় 50 থেকে 4000 অ্যাংষ্ট্রম ;

X-রশ্মির তরঙ্গদৈর্ঘ্য ঃ প্রায় $10^{-5}$ থেকে 50 অ্যাংষ্ট্রম।

(6·13) অনুচ্ছেদে X-রশ্মির তরঙ্গদৈর্ঘ্য পরিমাপের পদ্ধতি আলোচিত হবে।

## 6·4 : X-রশ্মির তীব্রতা পরিমাপ

(6·3) অনুচ্ছেদে দেখা গেছে যে ফোটোগ্রাফিক প্লেটের সাহায্যে বা উৎপন্ন আয়নন প্রবাহ পরিমাপ করে X-রশ্মির তীব্রতা মাপা যায়। দ্বিতীয় পদ্ধতিতে খুব সঠিক পরিমাপ সম্ভব। যে যন্ত্রের সাহায্যে এই পরিমাপ করা হয় তাকে 'আয়নন কক্ষ' (Ionization Chamber) বলা হয়। (6·4) চিত্রে একটি আয়নন কক্ষ প্রদর্শিত হয়েছে। C একটি পিতলের বেলনাকৃতি (Cylindrical) কক্ষ, যার দুই প্রান্ত হালকা ধাতুর পাতলা চাদর (W, W) দ্বারা আবৃত থাকে। এগুলিকে কক্ষের জানালা (Window) আখ্যা দেওয়া হয়। এদের যে কোন একটির মধ্য দিয়ে X-রশ্মি আয়নন কক্ষে প্রবেশ করে এবং বিপরীত জানালা দিয়ে কক্ষ থেকে নির্গত হয়। কক্ষটি সাধারণতঃ 20 থেকে 100 সেমি পর্যন্ত দীর্ঘ হয়। কক্ষটি প্রায় বায়ুমণ্ডলীয় চাপে কোন গ্যাস বা বাষ্প (যথা বাতাস, মিথাইল ব্রোমাইড ইত্যাদি) দ্বারা পূর্ণ থাকে। আপতিত

X-রশ্মি কক্ষ মধ্যস্থ গ্যাসকে আয়নিত করে ; ফলে ধনাত্মক আণবিক আয়ন ও ঋণাত্মক ইলেকট্রন সৃষ্ট হয়। আয়নন কক্ষের মধ্যে অক্ষের সমান্তরালে কক্ষ গাত্র থেকে অন্তরিত একটি ধাতব দণ্ড (R) রাখা থাকে। R এবং C এর মধ্যে কয়েক শত ভোল্ট পর্যন্ত সমদিষ্ট (D. C.) বিভব প্রভেদ প্রয়োগ করার ব্যবস্থা

চিত্র 6·4

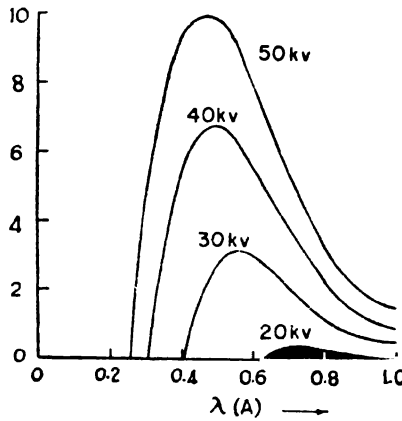
আয়নন কক্ষ।

থাকে। R দণ্ডটি একটি ইলেকট্রোমিটার (E) বা অনুরূপ খুব নিম্ন প্রবাহমাপক যন্ত্রের সংগে সংযুক্ত থাকে, যার সাহায্যে আয়নন প্রবাহ পরিমাপ করা হয়। আয়নন প্রবাহ মাত্রা আপতিত X-রশ্মির তীব্রতার সংগে একঘাতে (Linearly) সমানুপাতিক।

## 6·5 : উৎপন্ন X-রশ্মির তরঙ্গদৈর্ঘ্যের সংগে তীব্রতার পরিবর্তন

X-রশ্মি আধার থেকে বিভিন্ন তরঙ্গদৈর্ঘ্য সম্পন্ন রশ্মি নিঃসৃত হয়। যদি এই সমস্ত রশ্মির তীব্রতা পরিমাপ করা হয় এবং তীব্রতা ও তরঙ্গদৈর্ঘ্যের লেখচিত্র আঁকা হয় তাহলে সাধারণতঃ দুই প্রকার লেখচিত্র পাওয়া যায়। টাংষ্টেন ($Z=74$) প্রভৃতি উচ্চ পরমাণবিক সংখ্যা (Atomic Number) সম্পন্ন ধাতুর তৈয়ারী অ্যানোড বা লক্ষ্য বস্তু (Target) ব্যবহার করলে যেরূপ লেখচিত্র পাওয়া যায় তার নিদর্শন (6·5) চিত্রে দেখান হয়েছে। এই চিত্র থেকে দেখা যায় তরঙ্গদৈর্ঘ্যের সংগে তীব্রতা নিরবচ্ছিন্ন ভাবে পরিবর্তিত হয়। এইরূপ নিরবচ্ছিন্ন পরিবর্তন ক্যাথোড ও অ্যানোডের মধ্যে 50,000 ভোল্ট পর্যন্ত উচ্চ বিভব প্রভেদের ক্ষেত্রেও দেখা যায়। নির্দিষ্ট বিভব প্রভেদে তরঙ্গদৈর্ঘ্যের একটি ন্যূনতম মান ($\lambda_m$) থাকে, যার থেকে ক্ষুদ্রতর তরঙ্গদৈর্ঘ্যের রশ্মি নিঃসৃত হয় না।

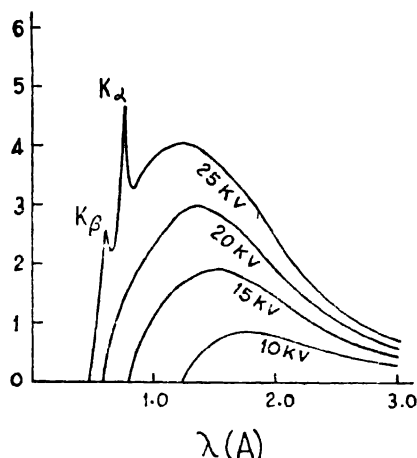
তরঙ্গদৈর্ঘ্য বৃদ্ধির সংগে X-রশ্মির তীব্রতা প্রথমে বৃদ্ধি পায়। একটি বৃহত্তম মান পর্যন্ত বৃদ্ধি পাওয়ার পর দীর্ঘতর তরঙ্গদৈর্ঘ্যে তীব্রতা আবার হ্রাস পেতে থাকে।

(6·5) চিত্রে বিভব প্রভেদের কয়েকটি বিভিন্ন মানে তরঙ্গদৈর্ঘ্যের সংগে X-রশ্মির তীব্রতা পরিবর্তনের লেখচিত্র দেখান হয়েছে। চিত্রগুলি থেকে দেখা

চিত্র 6·5

বিভিন্ন বিভবে টাংস্টেন লক্ষ্যবস্তু থেকে নিঃসৃত X-রশ্মির তীব্রতা পরিবর্তন লেখচিত্র।

যায় যে ন্যূনতম তরঙ্গদৈর্ঘ্য $\lambda_m$ এর মান বিভব প্রভেদ বৃদ্ধির সংগে হ্রাস পেতে থাকে। আবার নির্দিষ্ট তরঙ্গদৈর্ঘ্য সম্পন্ন রশ্মির তীব্রতার মান বিভব প্রভেদ বৃদ্ধির সংগে বৃদ্ধি পেতে থাকে।

লক্ষ্যবস্তু যদি অপেক্ষাকৃত নিম্নতর পরমাণবিক সংখ্যা সম্পন্ন হয়, যথা মলিবডেনাম ($Z=42$), তাহলে তরঙ্গদৈর্ঘ্যের সংগে তীব্রতা পরিবর্তন (6·6) চিত্রে প্রদর্শিত লেখচিত্রের মত হয়। এক্ষেত্রে অপেক্ষাকৃত নিম্নতর বিভব প্রভেদে ($V < 20,000$ ভোল্ট) নিরবচ্ছিন্ন পরিবর্তন দেখা যায়। উচ্চতর বিভব প্রভেদে ( যথা 25,000 ভোল্টে ) বিশেষ বিশেষ তরঙ্গদৈর্ঘ্যে নিরবচ্ছিন্ন লেখচিত্রগুলির উপর কতকগুলি অবচ্ছিন্ন (Discrete) সুতীক্ষ্ণ চূড়া দেখা যায়। বিভব প্রভেদ পরিবর্তনের সংগে এই চূড়াগুলির তরঙ্গদৈর্ঘ্যের কোন পরিবর্তন হয় না। আরও কম পরমাণবিক সংখ্যা সম্পন্ন লক্ষ্যবস্তু যথা

তামার ক্ষেত্রে এই ধরনের চূড়া বেশ নিম্ন বিভব প্রভেদেই ( $V > 8{,}000$ ভোল্টে ) দেখতে পাওয়া যায়। তামার ক্ষেত্রে প্রাপ্ত চূড়াগুলির তরঙ্গদৈর্ঘ্য মলিবডেনামের চূড়াগুলির তরঙ্গদৈর্ঘ্য থেকে ভিন্ন হয়। (6·5) ও (6·6) চিত্রে প্রদর্শিত পরীক্ষালব্ধ ফলাফল থেকে নিম্নলিখিত সিদ্ধান্তগুলি করা যায়ঃ

চিত্র 6·6

বিভিন্ন বিভবে মলিবডেনাম লক্ষ্যবস্তু থেকে নিঃসৃত X-রশ্মির তীব্রতা পরিবর্তন লেখচিত্র। উচ্চতর বিভবে চূড়ার আবির্ভাব লক্ষণীয়।

(ক) বিভব প্রভেদ বৃদ্ধির সংগে নিঃসৃত X-রশ্মির তীব্রতা বৃদ্ধি পায়।

(খ) একই বিভব প্রভেদে লক্ষ্যবস্তুর পরমাণবিক সংখ্যা (Atomic Number) বৃদ্ধির সংগে নিঃসৃত রশ্মির তীব্রতা বৃদ্ধি পায়।

(গ) নিঃসৃত X-রশ্মির তরঙ্গদৈর্ঘ্যের একটা ন্যূনতম মান থাকে। এই ন্যূনতম তরঙ্গদৈর্ঘ্য প্রযুক্ত বিভব প্রভেদের উপর নির্ভর করে। বিভব প্রভেদ বাড়লে ন্যূনতম তরঙ্গদৈর্ঘ্য $\lambda_m$ কম হয়।

(ঘ) একটি নির্দিষ্ট মান অপেক্ষা উচ্চতর বিভব প্রভেদে তীব্রতা বণ্টন (Intensity Distribution) লেখচিত্রে কতকগুলি চূড়ার আবির্ভাব হয়।

(ঙ) বিভব প্রভেদের যে ন্যূনতম মানে চূড়ার আবির্ভাব হয় তা লক্ষ্যবস্তুর উপর নির্ভর করে। লক্ষ্যবস্তুর পরমাণবিক সংখ্যা বৃদ্ধির সংগে উক্ত ন্যূনতম বিভব প্রভেদ বৃদ্ধি পায়।

(চ) লেখচিত্রে চূড়াগুলির অবস্থান ( তরঙ্গদৈর্ঘ্য ) লক্ষ্যবস্তুর উপর নির্ভর করে, বিভব প্রভেদের উপর নির্ভর করে না। উচ্চতর পরমাণবিক সংখ্যা সম্পন্ন লক্ষ্যবস্তুর ক্ষেত্রে চূড়াগুলির তরঙ্গদৈর্ঘ্য ক্ষুদ্রতর হয়। বস্তুতঃ টাংষ্টেন লক্ষ্যবস্তুর ক্ষেত্রেও বিভব প্রভেদের মান যথেষ্ট উচ্চ হলে ($V > 55{,}000$ ভোল্ট ) এইরূপ চূড়ার আবির্ভাব হয়।

(ছ) চূড়াগুলির উচ্চতা বিভব প্রভেদ বৃদ্ধির সংগে বৃদ্ধি পায়।

## 6·6 : নিরবচ্ছিন্ন X-রশ্মির উৎপত্তির কারণ

তড়িৎচুম্বকীয় তত্ত্ব থেকে জানা যায় যে যখন কোন আহিত কণিকা ( যথা ইলেকট্রন ) মন্দনশীল বা ত্বরণশীল গতিতে চলে তখন তারা তড়িৎচুম্বকীয় বিকিরণ নিঃসৃত করে। তাদের গতিশক্তির কিছু অংশ নিঃসৃত বিকিরণের শক্তিতে রূপান্তরিত হয়। X-রশ্মি আধারের মধ্যে উচ্চ শক্তি ইলেকট্রনগুলি লক্ষ্যবস্তুর ( অ্যানোডের ) উপর আপতিত হলে তাদের গতি বাধাপ্রাপ্ত হয়। ফলে তাদের গতিশক্তি কমতে থাকে—অর্থাৎ তাদের গতি মন্দনশীল হয়। সেজন্য তারা বিভিন্ন তরঙ্গদৈর্ঘ্য সম্পন্ন তড়িৎচুম্বকীয় বিকিরণ নিঃসৃত করে। আমরা জানি যে নির্দিষ্ট তরঙ্গদৈর্ঘ্য সম্পন্ন ফোটনের শক্তি হচ্ছে

$$E_\nu = h\nu = hc/\lambda \qquad \cdots \quad (6{\cdot}1)$$

এখানে $h$ হচ্ছে প্ল্যাংক ধ্রুবক ও $c$ হচ্ছে শূন্যে আলোকের বেগ। $\nu$ এবং $\lambda$ হচ্ছে যথাক্রমে নিঃসৃত রশ্মির কম্পাংক এবং তরঙ্গদৈর্ঘ্য। স্পষ্টতঃ X-রশ্মি নিঃসরণের ক্ষেত্রে নিঃসৃত ফোটনের উচ্চতম শক্তি হবে আপতিত ইলেকট্রনের প্রাথমিক শক্তির সমান ঃ

$$E_m = h\nu_m = \frac{hc}{\lambda_m} = eV \qquad (6{\cdot}2)$$

এখানে $V$ হচ্ছে X-রশ্মি আধারের মধ্যে প্রযুক্ত বিভব প্রভেদ, যার ফলে ক্যাথোড থেকে নির্গত ইলেকট্রনগুলি $eV$ শক্তি অর্জন করে লক্ষ্যবস্তুর উপর আপতিত হয়। নিঃসৃত X-রশ্মির তরঙ্গদৈর্ঘ্য নির্ভর করে ইলেকট্রনের শক্তির কত অংশ বিকিরণে রূপান্তরিত হয় তার উপর। সমীকরণ (6·2) থেকে বোঝা যায় যে যখন ইলেকট্রনের সমগ্র প্রাথমিক শক্তি $eV$ বিকিরণে রূপান্তরিত হয়, তখন নিঃসৃত বিকিরণের তরঙ্গদৈর্ঘ্য ন্যূনতম হয় এবং কম্পাংক ($\nu_m$) উচ্চতম হয়। এই ন্যূনতম তরঙ্গদৈর্ঘ্যের মান হচ্ছে

$$\lambda_m = \frac{hc}{eV} \qquad (6{\cdot}3)$$

বিভব প্রভেদ $V$ যদি ভোল্টে মাপা যায়, তাহলে উক্ত তরঙ্গদৈর্ঘ্য হয় (4·4 সমীকরণ দ্রষ্টব্য ) :

$$\lambda_m = \frac{12413}{V\ (\text{ভোল্ট})}\ \text{অ্যাংষ্ট্রম}$$

উদাহরণস্বরূপ, যখন $V = 10{,}000$ ভোল্ট হয়, তখন $\lambda_m = 1{\cdot}24$ অ্যাং হয়; আর যখন $V = 50{,}000$ ভোল্ট হয়, তখন $\lambda_m = 0{\cdot}248$ অ্যাং হয়।

উপরোক্ত পদ্ধতিতে নিঃসৃত X-রশ্মিকে বলা হয় 'ব্রেম্‌স্‌ষ্ট্রালুং' (Brehmsstrahlung)। জার্মান ভাষায় ব্রেম্‌স্ (Brehms) কথাটির অর্থ 'মন্দন' এবং ষ্ট্রালুং (Strahlung) কথাটির অর্থ 'বিকিরণ'। অর্থাৎ 'ব্রেম্‌স্‌ষ্ট্রালুং' বলতে বোঝায় 'মন্দন জনিত বিকিরণ'। নিঃসৃত বিকিরণের নিরবচ্ছিন্ন (Continuous) প্রকৃতি দৃশ্যমান সাদা আলোকের নিরবচ্ছিন্ন প্রকৃতির সংগে তুলনীয়। সেইজন্য এই বিকিরণকে অনেক সময় 'শ্বেত-বিকিরণ' (White Radiation) আখ্যাও দেওয়া হয়।

সাধারণতঃ আপতিত ইলেকট্রনগুচ্ছ কর্তৃক বাহিত শক্তির অল্প অংশ মাত্র বিকিরণে রূপান্তরিত হয়। বাকী অংশ তাপ শক্তিতে রূপান্তরিত হয়, যার ফলে লক্ষ্যবস্তুটি উত্তপ্ত হয়ে ওঠে। বেশী উত্তপ্ত হলে এটি গলে যেতে পারে। সেইজন্য একে শীতল রাখার প্রয়োজন হয়।

অনেক সময় ভেদ্যতা ক্ষমতা অনুযায়ী X-রশ্মির শ্রেণী বিভাগ করা হয়। খুব বেশী ভেদ্যতা ক্ষমতা সম্পন্ন বিকিরণকে বলা হয় 'কঠিন বিকিরণ' (Hard Radiation), অপেক্ষাকৃত কম ভেদ্যতা ক্ষমতা সম্পন্ন বিকিরণকে বলা হয় 'মধ্যম বিকিরণ' (Medium Radiation), খুব কম ভেদ্যতা সম্পন্ন বিকিরণকে বলা হয় 'নরম বিকিরণ' (Soft Radiation)।

### 6·7 : X-রশ্মির চূড়াগুলির উৎপত্তির কারণ

X-রশ্মি চূড়াগুলি আসলে অতি ক্ষুদ্র তরঙ্গদৈর্ঘ্য সম্পন্ন বর্ণালীরেখা। এদের উৎপত্তির কারণ পরমাণুর ইলেকট্রনীয় গঠনের মধ্যে নিহিত আছে। তৃতীয় পরিচ্ছেদে দেখা গেছে যে পরমাণুর বহিস্থ কক্ষপথের ইলেকট্রনকে উত্তেজিত অবস্থায় উন্নীত করলে সেটি পরমুহূর্তে যখন নিম্নতর শক্তিস্তরে ফিরে আসে, তখন যে বিকিরণ নিঃসৃত হয় তার থেকেই পরমাণুর দৃশ্যমান বা অতিবেগনী বর্ণালীরেখাগুলির সৃষ্টি হয়। পঞ্চম পরিচ্ছেদে আমরা দেখেছি যে এই ইলেকট্রনগুলি পরমাণু দেহে শিথিলভাবে আবদ্ধ থাকে। এদের বন্ধন

শক্তির (Binding Energy) পরিমাণ সাধারণতঃ কয়েক ইলেকট্রন-ভোল্ট মাত্র। এই বন্ধন শক্তি (আয়নন শক্তি) নিঃসৃত বিকিরণের শক্তির সমমাত্রিক হয়; বস্তুতঃ এই শক্তি শেষোক্ত শক্তি অপেক্ষা অল্প বেশী হয়। উদাহরণস্বরূপ সোডিয়াম D বর্ণালীরেখাগুলির গড় তরঙ্গদৈর্ঘ্য 5893 অ্যাং। অতএব এই বিকিরণের শক্তি হয়

$$E_\nu = \frac{hc}{\lambda} = \frac{12413}{5893\ (\text{অ্যাং})} = 2{\cdot}1 \ \text{ইলেকট্রন-ভোল্ট}$$

সোডিয়ামের বহিস্থ $3s$ ইলেকট্রনটির (5·4 অনুচ্ছেদ দ্রষ্টব্য) বন্ধন শক্তি উপরোক্ত শক্তি অপেক্ষা কিছু বেশী, প্রায় 5·1 ইলেকট্রন-ভোল্ট। বিভিন্ন পরমাণুর ক্ষেত্রে এই বন্ধন শক্তির পরিমাণ অবশ্য বিভিন্ন। উচ্চতম বন্ধন শক্তি পাওয়া যায় হিলিয়াম পরমাণুর ক্ষেত্রে, 24·54 ই-ভো। অপর পক্ষে নিঃসৃত X-রশ্মি রেখাগুলির তরঙ্গদৈর্ঘ্য মাত্র কয়েক অ্যাংষ্ট্রম হয়; এমন কী অনেক ক্ষেত্রে এক অ্যাংষ্ট্রম অপেক্ষা কমও হয়। কাজেই X-রশ্মি ফোটনগুলির শক্তির মাত্রা $10^4$ ই-ভো বা ততোধিক হয়। সুতরাং যে সব পরমাণবিক ইলেকট্রন X-রশ্মি বর্ণালীরেখাগুলি উৎপন্ন করে সেগুলির বন্ধন শক্তি অবশ্যই বেশ কয়েক সহস্র ইলেকট্রন ভোল্ট বা আরও বেশী হয়। অর্থাৎ এগুলি বহিস্থ কক্ষপথে আবর্তনশীল ইলেকট্রন অপেক্ষা অনেক বেশী দৃঢ় ভাবে পরমাণুর মধ্যে আবদ্ধ থাকে। এর থেকে বোঝা যায় যে এই ইলেকট্রনগুলি অবশ্যই পরমাণু কেন্দ্রকের খুব কাছাকাছি অবস্থিত থাকে, অর্থাৎ এগুলি হচ্ছে পরমাণুর অভ্যন্তরস্থ কক্ষপথে আবর্তনশীল ইলেকট্রন।

আমরা পঞ্চম পরিচ্ছেদে দেখেছি পরমাণুর মধ্যে ইলেকট্রনগুলি K, L, M প্রভৃতি বিভিন্ন কক্ষপথে বিন্যস্ত থাকে। সর্বাপেক্ষা ভিতরের K কক্ষপথে দুটি ইলেকট্রন থাকে। এইগুলি সর্বাপেক্ষা বেশী দৃঢ় সংবদ্ধ হয়। কারণ এগুলি পরমাণু কেন্দ্রকের সবচেয়ে নিকটে থাকে। এর বাইরে L কক্ষপথে আটটি ইলেকট্রন থাকে। এগুলি K ইলেকট্রন দুটি অপেক্ষা শিথিলতরভাবে সংবদ্ধ থাকে। এরপরে M কক্ষপথে আঠারটি ইলেকট্রন আরও শিথিলভাবে আবদ্ধ থাকে। এখন যদি X-রশ্মি আধারের মধ্যে একটি শক্তিশালী ইলেকট্রন লক্ষ্যবস্তুর উপর সবেগে আপতিত হয়, সেটি লক্ষবস্তুর কোন পরমাণুর অভ্যন্তর ভাগের কক্ষপথের (যথা K কক্ষপথের) একটি ইলেকট্রনের সংগে সংঘাত লাভ করতে পারে। যার ফলে উক্ত ইলেকট্রনটি পরমাণু থেকে উচ্ছিন্ন হতে পারে। যদি আপতিত ইলেকট্রনটির গতিশক্তি হয় $eV$

এবং K কক্ষপথে আবদ্ধ ইলেকট্রনের বন্ধন শক্তি হয় $E_K$, তাহলে নিঃসৃত K ইলেকট্রনটির গতিশক্তি হবে

$$\frac{1}{2}mv^2 = eV - E_K \qquad (6\cdot4)$$

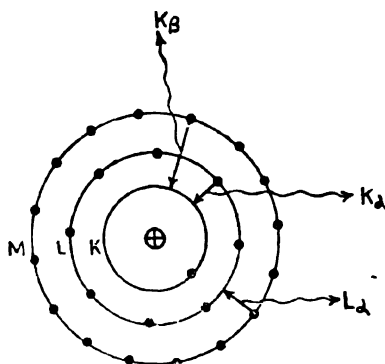
স্পষ্টতঃ একটি K ইলেকট্রন নিঃসৃত করতে হলে আপতিত ইলেকট্রনের গতিশক্তির মান ($eV$) অবশ্যই $E_K$ অপেক্ষা বেশী হতে হবে।

এইভাবে ইলেকট্রন নিঃসরণের ফলে K কক্ষপথে যে শূন্যতার সৃষ্টি হয় তা পূর্ণ করবার জন্য L,M,N প্রভৃতি বহিস্থ যে কোন কক্ষপথ থেকে একটি অপেক্ষাকৃত কম দৃঢ় সংবদ্ধ ইলেকট্রন ভিতরের K কক্ষপথে সংক্রমণ করে। তখন সেই ইলেকট্রনটির উদ্বৃত্ত শক্তি তড়িৎচুম্বকীয় বিকিরণ হিসাবে নিঃসৃত হয়। যদি এই সংক্রমণ L কক্ষপথ থেকে ঘটে এবং উক্ত কক্ষপথে ইলেকট্রনের বন্ধন শক্তি $E_L$ হয়, তাহলে নিঃসৃত X-রশ্মি ফোটনের শক্তি হয়

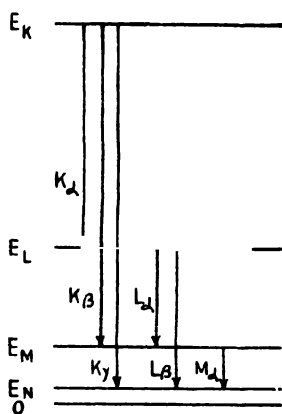
$$h\nu_{KL} = E_K - E_L \qquad (6\cdot5)$$

নিঃসৃত ফোটনের শক্তি $h\nu_{KL}$ নির্ভর করে লক্ষ্যবস্তুর K এবং L কক্ষপথে আবর্তনরত ইলেকট্রনের বন্ধন শক্তির উপর। এইসব বন্ধন শক্তি ধ্রুবক হয় এবং লক্ষ্যবস্তুর প্রকৃতির উপর নির্ভর করে। সেজন্য X-রশ্মির বর্ণালীরেখাগুলি নির্দিষ্ট কম্পাংক বা তরঙ্গদৈর্ঘ্য সম্পন্ন হয় এবং এই তরঙ্গদৈর্ঘ্য লক্ষ্যবস্তুর প্রকৃতির উপর নির্ভর করে।

সাধারণতঃ বিশেষ একটি লক্ষ্যবস্তুর ক্ষেত্রে একাধিক X-রশ্মি বর্ণালীরেখা দেখা যায়। এদের তরঙ্গদৈর্ঘ্য বিভিন্ন হয়। L, M, N প্রভৃতি বিভিন্ন কক্ষপথ থেকে K কক্ষপথে সংক্রমণের ফলে যে বর্ণালীরেখাগুলি উদ্ভূত হয় তাদের বলা হয় 'K শ্রেণীর রেখা' বা 'K রেখা'। অনুরূপভাবে M, N প্রভৃতি কক্ষপথ থেকে L কক্ষপথে সংক্রমণের ফলে উদ্ভূত রেখাগুলিকে বলা হয় L রেখা ; ইত্যাদি। এইরূপ বিভিন্ন শ্রেণীর রেখাগুলির উৎপত্তি (6·7) চিত্রে দেখান হয়েছে। এই জাতীয় চিত্রকে 'কোসেল চিত্র' (Kossel Diagram) বলা হয়। (6·8) চিত্রে বিভিন্ন X-রশ্মি রেখার উৎপত্তির শক্তিস্তর চিত্র (Energy Level Diagram) দেখান হয়েছে। যখন পরমাণুর মধ্যে সব ইলেকট্রনই বর্তমান থাকে তখন যদি পরমাণুর শক্তিকে শূন্য ধরা হয়, তাহলে একটি K ইলেকট্রন নিঃসরণের পর পরমাণুর শক্তি ( অর্থাৎ আয়নিত পরমাণু এবং নিঃসৃত শূন্য গতিশক্তি সম্পন্ন ইলেকট্রনের মোট শক্তি ) বেড়ে

$E_K$ হয়ে যায়। কারণ ইলেকট্রনটিকে বিচ্ছিন্ন করতে $E_K$ পরিমাণ শক্তি পরমাণুকে সরবরাহ করতে হয়। অনুরূপভাবে একটি L ইলেকট্রনহীন পরমাণুর শক্তি তার আদি শক্তি অপেক্ষা $E_L$ পরিমাণে বেশী হয়। (6·8)

চিত্র 6·7

X-রশ্মি বর্ণালীরেখার উৎপত্তি নির্দেশক 'কোসেল চিত্র'।

চিত্রে পরমাণুর এই বিভিন্ন শক্তিস্তরগুলি কতকগুলি অনুভূমিক রেখা দ্বারা নির্দেশ করা হয়েছে। যেহেতু $E_K > E_L > E_M \cdots$, উক্ত চিত্রে K স্তরটি

চিত্র 6·8

X-রশ্মি বর্ণালীরেখার উৎপত্তি নির্দেশক শক্তিস্তর চিত্র।

সর্বাপেক্ষা উপরে, L স্তর তার নীচে, M স্তর আরও নীচে এইভাবে অবস্থিত

থাকে। উপরের আলোচনা থেকে বোঝা যায় যে একটি K ইলেকট্রনহীন পরমাণুর মধ্যে যখন একটি ইলেকট্রন L কক্ষপথ থেকে K কক্ষপথে সংক্রমণ করে, পরমাণুটি তখন K শক্তিস্তর থেকে L স্তরে সংক্রমিত হয়। ফলে নিঃসৃত X রশ্মি ফোটনের শক্তি উপরোক্ত স্তর দুটির শক্তি পার্থক্য $(E_K - E_L)$ এর সমান হয়।

বিভিন্ন বহিস্থ কক্ষপথ থেকে সংক্রমণের ফলে উদ্ভূত রেখাগুলিকে $\alpha$, $\beta$, $\gamma$, ··· ইত্যাদি চিহ্ন দ্বারা নির্দেশিত করা হয়। উদাহরণস্বরূপ

K → L সংক্রমণ দ্বারা সৃষ্ট রেখাকে বলা হয় $K_\alpha$ রেখা
K → M " " " " " " $K_\beta$ "
L → M " " " " " " $L_\alpha$ "
L → N " " " " " " $L_\beta$ " ইত্যাদি।

উপরোক্ত রেখাগুলির কম্পাংক হয়

$$\nu\,(K_\alpha) = \frac{E_K - E_L}{h}$$

$$\nu\,(K_\beta) = \frac{E_K - E_M}{h}$$

$$\nu\,(L_\alpha) = \frac{E_L - E_M}{h}$$

$$\nu\,(L_\beta) = \frac{E_L - E_N}{h}$$

যেহেতু X-রশ্মির বর্ণালীরেখাগুলি উৎপন্ন হয় লক্ষ্যবস্তুর বিভিন্ন কক্ষপথের মধ্যে ইলেকট্রন সংক্রমণের ফলে, অতএব রেখাগুলির কম্পাংক বা তরঙ্গদৈর্ঘ্য লক্ষ্যবস্তুর প্রকৃতির উপর নির্ভর করে। সেইজন্য এই জাতীয় বিকিরণকে বলা হয় 'বৈশিষ্ট্যপূর্ণ বিকিরণ' (Characteristic Radiation)। X-রশ্মি নল থেকে নিঃসৃত নিরবচ্ছিন্ন (Continuous) বিকিরণকে বিভিন্ন মৌল থেকে বিক্ষিপ্ত (Scatter) করেও এইরূপ বৈশিষ্ট্যপূর্ণ বিকিরণ উৎপন্ন করা যায়। নির্দিষ্ট বিক্ষেপকের (Scatterer) পরমাণুর উপর আপতিত X-রশ্মি ফোটন উক্ত পরমাণুর K, L প্রভৃতি বিভিন্ন আভ্যন্তরীণ কক্ষপথ থেকে ইলেকট্রন উচ্ছিন্ন করতে পারে। এইরূপ ঘটা অবশ্য সম্ভব হয়

যদি আপতিত ফোটনের শক্তি ($h\nu$) উপরোক্ত কক্ষপথগুলিতে আবর্তনশীল ইলেকট্রনের বন্ধন শক্তি অপেক্ষা বেশী হয়। যখন এইরূপ ঘটে, তখন আভ্যন্তরীণ কক্ষপথে একটি ইলেকট্রনের স্থান শূন্য হয়। বহিস্থ কোন কক্ষপথ থেকে একটি ইলেকট্রন তখন সংক্রমণ করে উক্ত শূন্য স্থান পূর্ণ করে। ফলে উক্ত ইলেকট্রনের অতিরিক্ত শক্তি বৈশিষ্ট্যপূর্ণ বিকিরণ হিসাবে নিঃসৃত হয়। বৈশিষ্ট্যপূর্ণ X-বিকিরণকে অনেক সময় 'প্রতিপ্রভ বিকিরণ' (Fluorescent Radiation) বলা হয় (3·16 অনুচ্ছেদ দ্রষ্টব্য)।

সূক্ষ্মতর পরিমাপের সাহায্যে দেখা যায় যে উপরোক্ত X-রশ্মি বর্ণালী-রেখাগুলি একক নয়—এদের প্রত্যেকটির সূক্ষ্ম গঠন (Fine Structure) আছে। অর্থাৎ এদের প্রত্যেকটি একাধিক খুব কাছাকাছি কম্পাংক সম্পন্ন

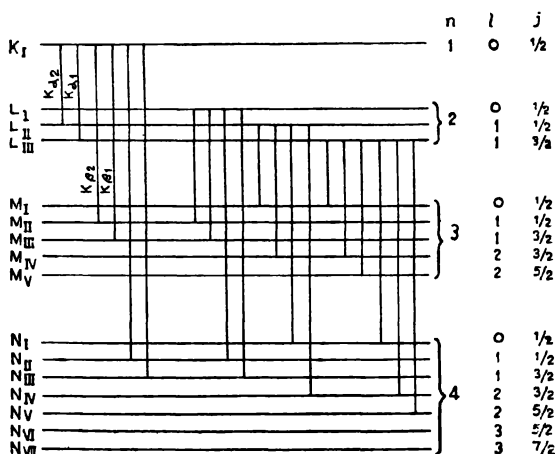
**সারণী 6·1**

| খোলস | $n$ | $l$ | $j$ | শক্তিস্তরের চিহ্ন | শক্তিস্তরের বহুলতা |
|---|---|---|---|---|---|
| K | 1 | 0 | $\frac{1}{2}$ | K | 1 |
| L | 2 | 0 | $\frac{1}{2}$ | $L_I$ | |
| | | 1 | $\frac{1}{2}$ | $L_{II}$ | 3 |
| | | 1 | $\frac{3}{2}$ | $L_{III}$ | |
| M | 3 | 0 | $\frac{1}{2}$ | $M_I$ | |
| | | 1 | $\frac{1}{2}$ | $M_{II}$ | |
| | | 1 | $\frac{3}{2}$ | $M_{III}$ | 5 |
| | | 2 | $\frac{3}{2}$ | $M_{IV}$ | |
| | | 2 | $\frac{5}{2}$ | $M_V$ | |
| N | 4 | 0 | $\frac{1}{2}$ | $N_I$ | |
| | | 1 | $\frac{1}{2}$ | $N_{II}$ | |
| | | 1 | $\frac{3}{2}$ | $N_{III}$ | 7 |
| | | 2 | $\frac{3}{2}$ | $N_{IV}$ | |
| | | 2 | $\frac{5}{2}$ | $N_V$ | |
| | | 3 | $\frac{5}{2}$ | $N_{VI}$ | |
| | | 3 | $\frac{7}{2}$ | $N_{VII}$ | |

X-রশ্মি রেখা দ্বারা গঠিত। আমরা পঞ্চম পরিচ্ছেদে দেখেছি যে পরমাণুর প্রত্যেক কক্ষপথ এবং শক্তিস্তর তিনটি কোয়ানটাম সংখ্যা দ্বারা নির্ধারিত হয়; এগুলি হচ্ছে $n$ বা প্রধান কোয়ানটাম সংখ্যা, $l$ বা কক্ষীয় কোয়ানটাম সংখ্যা এবং $j$ বা মোট কোয়ানটাম সংখ্যা। এদের মধ্যে প্রধান কোয়ানটাম সংখ্যা $n$ মোটামুটি ভাবে $K (n=1)$, $L (n=2)$ প্রভৃতি কক্ষপথ বা খোলসের (Shell) ব্যাস নির্ধারিত করে। নির্দিষ্ট $n$ সম্পন্ন শক্তিস্তরের জন্য কক্ষীয় কোয়ানটাম সংখ্যা $l=0, 1, 2, \ldots (n-1)$ হতে পারে। অর্থাৎ $l$-এর $n$ সংখ্যক বিভিন্ন মান সম্ভব। আবার নির্দিষ্ট $l$-এর জন্য মোট কোয়ানটাম সংখ্যা $j=l+\frac{1}{2}$ এবং $j=l-\frac{1}{2}$ হওয়া সম্ভব। যখন $l=0$ হয়, তখন $j=+\frac{1}{2}$, এই একটি মাত্র মান সম্ভব; কারণ $j$ ঋণাত্মক হতে পারে না। বিভিন্ন সম্ভাব্য X-রশ্মি স্তরগুলিকে (6 1) সারণীতে প্রদর্শিত পদ্ধতিতে নির্দেশিত করা হয়।

বিভিন্ন শক্তিস্তরের মধ্যে সংক্রমণ নিম্নলিখিত নির্বাচন সূত্র (Selection Rule) দুটি দ্বারা নির্ধারিত হয়ঃ

$$\Delta l = \pm 1 \quad \text{এবং} \quad \Delta j = 0, \pm 1 \tag{6·6}$$

এই সূত্র দুটি ইতিপূর্বে আলোচিত বহিস্থ ইলেকট্রন সংক্রমণের ক্ষেত্রে প্রযোজ্য নির্বাচন সূত্রদ্বয়ের (সমীকরণ 5·21 এবং 5·22) অনুরূপ।

চিত্র 6·9

X-রশ্মি বর্ণালীরেখাসমূহের সূক্ষ্ম গঠন।

উপরে আলোচিত বিভিন্ন শক্তিস্তর এবং X-রশ্মি উৎপাদক সংক্রমণগুলি (6·9) চিত্রে দেখান হয়েছে। চিত্র থেকে দেখা যায় যে প্রতিটি K রেখা দুটি রেখার দ্বারা গঠিত। যথা $K_\alpha$ রেখাটির মধ্যে $K_{\alpha_1}$ এবং $K_{\alpha_2}$ দুটি রেখা থাকে। অনুরূপে $K_\beta$ রেখাটির মধ্যে $K_{\beta_1}$ এবং $K_{\beta_2}$ দুটি রেখা থাকে। $K_{\alpha_2}$ রেখার উৎপত্তি হয় K স্তর ($n=1$, $l=0$, $j=\frac{1}{2}$) থেকে $L_{II}$ শক্তিস্তরে ($n=2$, $l=1$, $j=\frac{1}{2}$) সংক্রমণের ফলে। $K_{\alpha_1}$ রেখার উৎপত্তি হয় K স্তর থেকে $L_{III}$ স্তরে ($n=2$, $l=1$, $j=\frac{3}{2}$) সংক্রমণের ফলে; ইত্যাদি। L, M প্রভৃতি রেখাগুলির বিভাজন আরও জটিল। (6·9) চিত্রে এইরূপ একটি রেখার বিভাজনের নিদর্শনও দেখান হয়েছে।

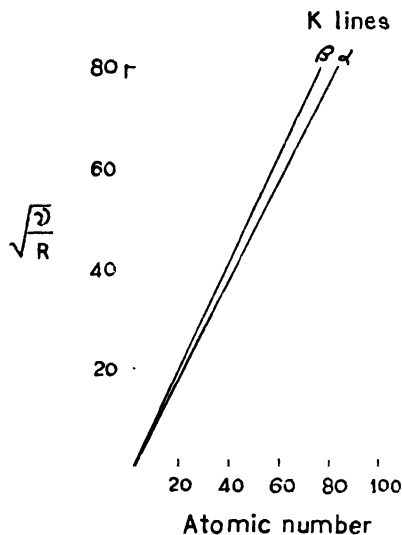
সাধারণতঃ K খোলসে ইলেকট্রনের বন্ধন শক্তি L, M প্রভৃতি খোলসের তুলনায় অনেক বেশী; ফলে K রেখাগুলির শক্তি এবং কম্পাংক অন্য রেখাগুলির তুলনায় অনেক বেশী হয়। অর্থাৎ K রেখাগুলির তরঙ্গদৈর্ঘ্য L, M ইত্যাদি রেখার তরঙ্গদৈর্ঘ্য অপেক্ষা অনেক কম হয়। আবার L রেখাগুলির তরঙ্গদৈর্ঘ্য M রেখাগুলির তুলনায় কম, M রেখাগুলির তরঙ্গদৈর্ঘ্য N রেখাগুলির তুলনায় কম, ইত্যাদি। অর্থাৎ

$$\lambda_K < \lambda_L < \lambda_M < \lambda_N < \cdots$$

অথবা $$\nu_K > \nu_L > \nu_M > \nu_N > \cdots$$

### 6·8: মোজ্‌লের সূত্র:

১৯১৩ সালে বৃটিশ বিজ্ঞানী মোজ্‌লে (H.G.J. Moseley) X-রশ্মি রেখাগুলির কম্পাংক ($\nu$) এবং লক্ষ্যবস্তুর পরমাণবিক সংখ্যা $Z$ এর মধ্যে একটি অত্যন্ত গুরুত্বপূর্ণ সম্পর্ক আবিষ্কার করেন। এই সম্পর্ককে বলা হয় 'মোজ্‌লের সূত্র' (Moseley's Law)। তিনি দেখান যে বিভিন্ন লক্ষ্যবস্তু নিঃসৃত $K_\alpha$ রেখাগুলির কম্পাংকের বর্গমূল $\sqrt{\nu_{K\alpha}}$ এবং লক্ষ্যবস্তুর পরমাণবিক সংখ্যা $Z$ এর লেখচিত্র একটি সরলরেখা হয়। অনুরূপভাবে $K_\beta$ রেখাগুলির কম্পাংকের বর্গমূল $\sqrt{\nu_{K\beta}}$ এবং $Z$ এর লেখচিত্রও একটি সরলরেখা হয়, যার নতি (Slope) প্রথমোক্ত সরলরেখার নতি থেকে পৃথক হয়। আমরা ইতিপূর্বে দেখেছি যে প্রকৃতপক্ষে $K_\alpha$, $K_\beta$ প্রভৃতি রেখাগুলির দ্বৈত (Doublet) গঠন আছে। কিন্তু মোজ্‌লের সময়ে এই দ্বৈত গঠনের কথা জানা ছিল না। কাজেই তিনি উক্ত রেখাগুলির পরিমিত গড় কম্পাংক

ব্যবহার করে লেখচিত্রগুলি অংকন করেন। (6·10) চিত্রে এইরূপ কয়েকটি মোজ্‌লে চিত্র (Moseley Diagrams) দেখান হয়েছে। এদের প্রত্যেকটি নিম্নলিখিত ধরনের সমীকরণ দ্বারা প্রকাশ করা যায়ঃ

চিত্র 6·10

মোজ্‌লে চিত্র। চিত্রে কোটি (Ordinate) অভিমুখে রিডবার্গ ধ্রুবক $R$ দ্বারা বিভাজিত কম্পাংকের বর্গমূল নির্দেশিত করা হয়েছে।

$$\sqrt{\nu} = C_1(Z-a) \tag{6·7}$$

অথবা
$$\nu = C(Z-a)^2 \tag{6·8}$$

এখানে $C_1$, $C$ এবং $a$ হচ্ছে ধ্রুবক।

$K_\alpha$ শ্রেণীর ক্ষেত্রে পাওয়া যায় $C=\frac{3}{4}Rc$ ; এখানে $R$ হচ্ছে বোর তত্ত্বে আলোচিত রিডবার্গ ধ্রুবক (Rydberg Constant) এবং $c$ হচ্ছে শূন্যে আলোকের বেগ। $a \backsimeq 1$ পাওয়া যায়। সুতরাং (6·8) সমীকরণকে লেখা যায়ঃ

$$\nu_{K\alpha} = \frac{3}{4}Rc(Z-1)^2$$
$$= Rc(Z-1)^2\left(\frac{1}{1^2}-\frac{1}{2^2}\right) \tag{6·9}$$

সমীকরণ (6·9) হচ্ছে বোর তত্ত্ব থেকে প্রাপ্ত লাইম্যান শ্রেণীর প্রথম বর্ণালীরেখাটির কম্পাংক নির্ধারক সমীকরণের অনুরূপ (3·6 অনুচ্ছেদ দ্রষ্টব্য)। উক্ত সমীকরণ এবং (6·9) সমীকরণের প্রভেদ শুধু এই যে শেষোক্ত ক্ষেত্রে কেন্দ্রকীয় আধান $Z$ এর পরিবর্তে $(Z-1)$ ধরা হয়েছে।

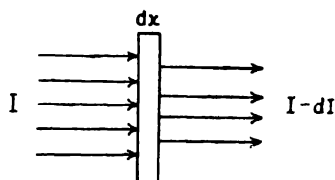
ইতিপূর্বে মেণ্ডেলীয়েভ (D. Mendeleev) তাঁর পর্যায় সারণীতে (Periodic Table) বিভিন্ন মৌলগুলিকে ক্রমবর্ধমান পরমাণবিক ভার অনুযায়ী তালিকাবদ্ধ করেন ( পঞ্চম পরিচ্ছেদ দ্রষ্টব্য )। কিন্তু এই তালিকার মধ্যে কয়েকটি অসংগতি লক্ষ্য করা যায়। উদাহরণস্বরূপ মেণ্ডেলীয়েভ প্রথম সংক্রমণ শ্রেণীর (Transition Group) অন্তর্গত তিনটি মৌল লোহা, নিকেল এবং কোবাল্টকে সাজিয়েছিলেন Fe, Ni এবং Co, এই অনুক্রমে। কিন্তু এদের রাসায়নিক গুণাবলী অনুযায়ী সাজান উচিত Fe, Co Ni, এই অনুক্রমে। অর্থাৎ কোবাল্টের স্থান নিকেলের আগে হওয়া উচিত, পরে নয়। মোজ্‌লে চিত্র থেকে দেখা যায় যে কোবাল্টের $K_\alpha$ রেখার কম্পাংক নিকেলের তুলনায় কম। অতএব সমীকরণ (6·9) অনুযায়ী কোবাল্টের $Z$ নিকেলের তুলনায় কম হয়; অর্থাৎ মোজ্‌লে চিত্র অনুসারেও কোবাল্টের স্থান নিকেলের আগে হওয়া উচিত। মোজ্‌লের পূর্বে পরমাণবিক সংখ্যার প্রকৃত তাৎপর্য উপলব্ধি করা হয়নি। তিনিই প্রথম দেখান যে পর্যায় সারণীতে পরমাণবিক ভার অনুযায়ী না সাজিয়ে মৌলগুলিকে মোজ্‌লে চিত্র হতে প্রাপ্ত ক্রমিক সংখ্যা অনুযায়ী সাজান উচিত। এই ক্রমিক সংখ্যাই হচ্ছে 'পরমাণবিক সংখ্যা' $(Z)$।

মোজ্‌লে আরও দেখান যে তাঁর চিত্রে কতকগুলি মৌলের ( যথা $Z=43$ ) স্থান শূন্য ছিল। পরবর্তী যুগে এগুলি আবিষ্কৃত হয়েছে।

X-রশ্মি বর্ণালীরেখার উৎপত্তি সম্বন্ধে (6·7) অনুচ্ছেদে প্রদত্ত আলোচনা থেকে মোজ্‌লে সমীকরণ (6·9) ব্যাখ্যা করা যায়। আমরা ইতিপূর্বে দেখেছি যে $K_\alpha$ রেখার উদ্ভব হয় $n=2$ থেকে $n=1$ কক্ষপথে সংক্রমণের ফলে। বোর তত্ত্ব থেকে হাইড্রোজেন সদৃশ পরমাণুর ক্ষেত্রে উক্ত সংক্রমণের ফলে উদ্ভূত বর্ণালীরেখার কম্পাংকের মান $\nu=RZ^2\left(\frac{1}{1^2}-\frac{1}{2^2}\right)$ হয়। এইরূপ পরমাণুর ক্ষেত্রে একটিমাত্র কক্ষীয় ইলেকট্রন থাকে, যার উপর কেন্দ্রকের সমগ্র আধান $+Ze$ ক্রিয়া করে; সেজন্য উপরোক্ত সমীকরণে $Z^2$ উৎপাদকটির আবির্ভাব হয়। বর্তমান ক্ষেত্রে K খোলসে অবস্থিত দুটির মধ্যে

একটি ইলেকট্রন পরমাণু থেকে বিচ্ছিন্ন হওয়ার ফলে উক্ত খোলসে আর একটি মাত্র ইলেকট্রন অবশিষ্ট থাকে। ফলে বিকিরণ নিঃসরণকারী L খোলসের ইলেকট্রনের উপরে কেন্দ্রকের সমগ্র ধনাত্মক আধান $+Ze$ ক্রিয়া করতে পারে না। K খোলসে আবর্তনরত একটি মাত্র অবশিষ্ট ইলেকট্রন কেন্দ্রকের আধানকে ঘিরে থাকে বলে, বহিস্থ L ইলেকট্রনের উপরে ক্রিয়াশীল কার্যকরী আধানের পরিমাণ কমে গিয়ে $(Z-1)e$ হয়; এইভাবে (6·9) সমীকরণে $(Z-1)^2$ উৎপাদকটির উপস্থিতির কারণ বোঝা যায়।

## 6·9 : X-রশ্মির শোষণ

যদি একটি সমান্তরাল X-রশ্মিগুচ্ছ কোন পদার্থের ভিতর দিয়ে চলে যায়, তাহলে উক্ত পদার্থের অন্য দিকে নির্গত রশ্মির তীব্রতা কমে যায়। মনে করা যাক যে $I$ তীব্রতা সম্পন্ন একগুচ্ছ সমান্তরাল X-রশ্মি খুব অল্প বেধ সম্পন্ন কোন পদার্থের উপর লম্বভাবে আপতিত হয় ( 6·11 চিত্র দ্রষ্টব্য )। যদি

চিত্র 6·11

X-রশ্মির শোষণ।

পদার্থটির বেধ হয় $dx$ তাহলে নির্গত রশ্মির তীব্রতা হ্রাসের পরিমাণ $dI$ নির্ভর করে আপতিত তীব্রতা $I$ এবং পদার্থটির বেধ $dx$-এর উপর। অতএব আমরা লিখতে পারি

$$dI \propto I dx$$

সুতরাং $$dI = -\mu I dx \qquad (6·10)$$

এখানে $\mu$ একটি ধ্রুবক ; এই ধ্রুবকটিকে 'শোষণ গুণাংক' (Absorption Coefficient) বলা হয়। (6·10) সমীকরণের ডানদিকে ঋণাত্মক চিহ্নের কারণ হচ্ছে যে বেধ $x$ যত বাড়ে তীব্রতা $I$ তত কমে। উপরের সমীকরণের সমাকলন করে পাওয়া যায়

$$I = I_0 e^{-\mu x} \qquad (6·11)$$

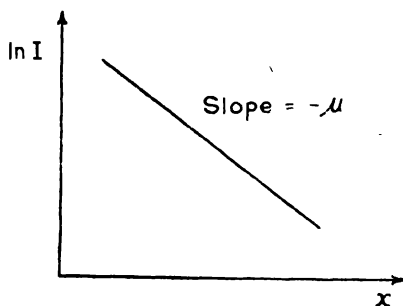
এখানে $I_0$ হচ্ছে X-রশ্মিগুচ্ছের প্রাথমিক তীব্রতা এবং $I$ হচ্ছে $x$-বেধ সম্পন্ন পদার্থ থেকে নির্গত রশ্মির তীব্রতা। যদি বেধ $x$ মাপা হয় দৈর্ঘ্যের এককে (যথা সেণ্টিমিটারে বা ফুটে) তাহলে $\mu$ ধ্রুবকটিকে বলা হয় 'রৈখিক শোষণ গুণাংক' (Linear Absorption Coefficient)। স্পষ্টতঃ যদি $x$-এর মান $x_{\frac{1}{2}}$ এমন হয় যে নির্গত রশ্মির তীব্রতা প্রাথমিক তীব্রতার অর্ধেক হয়ে যায়, তাহলে আমরা পাই

$$I/I_0 = \exp(-\mu . x_{\frac{1}{2}}) = \tfrac{1}{2}$$

অতএব
$$\mu = \frac{\ln 2}{x_{\frac{1}{2}}} = \frac{0{\cdot}693}{x_{\frac{1}{2}}} \qquad (6{\cdot}12)$$

$x_{\frac{1}{2}}$ পরিমাপ করে উপরের সমীকরণের সাহায্যে রৈখিক শোষণ গুণাংক নির্ণয় করা সম্ভব। বিভিন্ন পদার্থের জন্য $x_{\frac{1}{2}}$ বিভিন্ন হয়। সমীকরণ (6·11) থেকে পাওয়া যায়

$$\ln I = \ln I_0 - \mu x$$

সুতরাং নির্গত রশ্মির তীব্রতা পরিমাপ করে $\ln I$ এবং $x$-এর যদি লেখচিত্র আঁকা যায়, তাহলে একটি সরলরেখা পাওয়া যাবে। এই সরলরেখার নতি (Slope) থেকেও $\mu$ নির্ণয় করা যায় (6·12 চিত্র দ্রষ্টব্য)। সমীকরণ

চিত্র 6·12

$\ln I$ এবং $x$-এর লেখচিত্র।

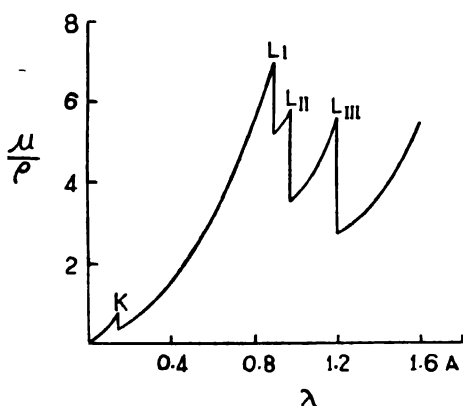
(6·12) থেকে দেখা যায় যে $\mu$ হচ্ছে দৈর্ঘ্যের বিপরীত মাত্রা (Dimension) সম্পন্ন একটি রাশি। (6·10) সমীকরণকে লেখা যায়

$$\frac{dI}{I} = -\frac{\mu}{\rho}\rho dx = -\frac{\mu}{\rho} dm$$

এখানে $\rho$ হচ্ছে শোষক পদার্থের ঘনত্ব এবং $dm = \rho dx$ হচ্ছে $dx$ বেধ সম্পন্ন এবং একক প্রস্থচ্ছেদ বিশিষ্ট শোষক পদার্থের একটি বেলনের (Cylinder) ভর। অর্থাৎ এখানে শোষকের বেধ দৈর্ঘ্যের এককের বদলে ভরের এককে প্রকাশ করা হয়। যদি $dm = 1$ হয়, তাহলে $dI/I = -\mu/\rho$ হয়। অর্থাৎ প্রতি একক ক্ষেত্রফলে একক ভর সম্পন্ন শোষক পদার্থের মধ্য দিয়ে যাবার সময় X-রশ্মির তীব্রতার $\mu/\rho$ অংশ হ্রাস পায়। $(\mu/\rho)$ সংখ্যাটিকে বলা হয় 'ভর-শোষণ গুণাংক' (Mass Absorption Coefficient)।

(6·11) সমীকরণকে এখন লেখা যায়

$$I = I_0 e^{-\frac{\mu}{\rho}\rho x} = I_0 e^{-\frac{\mu}{\rho} m}$$

নির্দিষ্ট তরঙ্গদৈর্ঘ্য সম্পন্ন X-রশ্মির ক্ষেত্রে $\mu/\rho$ নির্ভর করে $Z$, অর্থাৎ শোষক পদার্থের পরমাণবিক সংখ্যার উপর। দেখা যায় $\mu/\rho \propto Z^4$ হয়।

চিত্র 6·13

X-রশ্মি তরংগদৈর্ঘ্যের সংগে $\mu/\rho$ পরিবর্তনের লেখচিত্র।

অর্থাৎ $Z$ বাড়লে $\mu/\rho$ খুব দ্রুত বৃদ্ধি পায়। সেইজন্য সীসা ($Z = 82$) প্রভৃতি উচ্চ $Z$ সম্পন্ন পদার্থে X-রশ্মি খুব বেশী শোষিত হয়। অপরপক্ষে অ্যালুমিনিয়াম ($Z = 13$) প্রভৃতি নিম্ন $Z$ সম্পন্ন পদার্থের মধ্যে X-রশ্মি কম শোষিত হয়।

$\mu/\rho$ আপতিত X-রশ্মির তরঙ্গদৈর্ঘ্যের ($\lambda$) উপরেও নির্ভর করে। দেখা

যায় যে $\mu/\rho \propto \lambda^3$ হয় ; অর্থাৎ $\lambda$ বাড়লে $\mu/\rho$ বৃদ্ধি পায়। সুতরাং দীর্ঘতর তরঙ্গদৈর্ঘ্য সম্পন্ন X-রশ্মি সহজেই শোষিত হয়। (6·13) চিত্রে তরঙ্গদৈর্ঘ্যের সংগে $\mu/\rho$ পরিবর্তনের লেখচিত্র দেখান হয়েছে। $\lambda$ বৃদ্ধির সংগে $\mu/\rho$ প্রথমে কিছুদূর পর্যন্ত নিরবচ্ছিন্ন ভাবে বৃদ্ধি পায়। অবশেষে তরঙ্গদৈর্ঘ্যের একটি বিশেষ মানে ($\lambda = \lambda_K$), $\mu/\rho$ সহসা খুব কমে যায়। অর্থাৎ $\mu/\rho$ এর মানে একটি অবচ্ছিন্নতা (Discontinuity) দেখা যায়। তরঙ্গদৈর্ঘ্যের মান আরও বাড়ালে $\mu/\rho$ আবার পূর্বের মত বৃদ্ধি পেতে থাকে। অবশেষে তরঙ্গদৈর্ঘ্যের আর একটি বিশেষ মানে ($\lambda = \lambda_{L_I}$), $\mu/\rho$ আবার হঠাৎ পূর্বের মত কমে যায়। এরপর তরঙ্গদৈর্ঘ্যের খুব অল্প ব্যবধানে $\mu/\rho$ এর মানে পরপর আরও দুইবার অনুরূপ অবচ্ছিন্নতা দেখা যায়।

প্রথম যে তরঙ্গদৈর্ঘ্যে ($\lambda_K$) ভর-শোষণ গুণাংকের উপরোক্ত অবচ্ছিন্নতা দেখা যায় তাকে বলা হয় K 'শোষণ-সীমার' (K Absorption Edge) তরঙ্গদৈর্ঘ্য। অনুরূপভাবে পরের তিনটি অবচ্ছিন্নতা যে তরঙ্গদৈর্ঘ্যে দেখা যায় সেগুলিকে বলা হয় $L_I$, $L_{II}$ এবং $L_{III}$ শোষণ-সীমার তরঙ্গদৈর্ঘ্য ($\lambda_{L_I}$, $\lambda_{L_{II}}$, $\lambda_{L_{III}}$)। এই শোষণ-সীমাগুলির মান শোষকের প্রকৃতির উপর নির্ভর করে। K শোষণ-সীমার তরঙ্গদৈর্ঘ্য শোষক পদার্থ নিঃসৃত X-রশ্মি রেখাগুলির ন্যূনতম তরঙ্গদৈর্ঘ্য অপেক্ষা অল্প কম হয়। উদাহরণস্বরূপ তামার ক্ষেত্রে ($Z = 29$) $K_\alpha$ রেখাদুটির তরঙ্গদৈর্ঘ্য $\lambda(K_{\alpha_2}) = 1{\cdot}5443$ অ্যাং এবং $\lambda(K_{\alpha_1}) = 1{\cdot}5405$ অ্যাং হয় ; $K_\beta$ রেখার ক্ষেত্রে $\lambda(K_{\beta_1}) = 1{\cdot}3922$ অ্যাং ; $K_\gamma$ রেখার ক্ষেত্রে $\lambda(K_\gamma) = 1{\cdot}3810$ অ্যাং ; ইত্যাদি পাওয়া যায়। অপরপক্ষে তামার ক্ষেত্রে K শোষণ-সীমার তরঙ্গদৈর্ঘ্য $\lambda_K = 1{\cdot}3802$ অ্যাং হয়।

উপরোক্ত তথ্যগুলি নিম্নলিখিত উপায়ে ব্যাখ্যা করা যায়। যদি আপতিত X-রশ্মি ফোটনের শক্তি $E_\nu$ শোষক পরমাণুর K খোলসে আবদ্ধ ইলেকট্রনের বন্ধন শক্তি $E_K$ অপেক্ষা বেশী হয়, তাহলে এই ইলেকট্রনটি আপতিত ফোটন শোষণ করে পরমাণু থেকে বিচ্ছিন্ন হতে পারে। এইভাবে নিঃসৃত ইলেকট্রনটির গতিশক্তি $\frac{1}{2}mv^2 = E_\nu - E_K$ হয়। এই ধরনের ইলেকট্রন নিঃসরণ বস্তুতঃ X-রশ্মি দ্বারা আলোক-তাড়িত (Photo Electric) নিঃসরণেরই নিদর্শন। এক্ষেত্রে অবশ্য সংযোজী (Valence) ইলেকট্রনের পরিবর্তে পরমাণুর আভ্যন্তরীণ কক্ষপথে আবর্তনশীল একটি ইলেকট্রন নিঃসৃত

হয় ( 4·6 অনুচ্ছেদ দ্রষ্টব্য )। আপতিত X-রশ্মির শক্তি ($E_\nu$) কমালে, অর্থাৎ তরঙ্গদৈর্ঘ্য বাড়ালে, শোষণ গুণাংক বাড়ে। অবশেষে যখন এই শক্তি K খোলসে আবদ্ধ ইলেকট্রনকে বিচ্ছিন্ন করার জন্য প্রয়োজনীয় শক্তির ঠিক সমান হয় ( অর্থাৎ $E_\nu = E_K$ হয় ) তখন শোষণ গুণাংক উচ্চতম হয়। $E_\nu$ যখন $E_K$ অপেক্ষা কম হয়, তখন আর K খোলস থেকে ইলেকট্রন বিচ্ছিন্ন করবার জন্য যথেষ্ট শক্তি আপতিত X-রশ্মির থাকে না। কাজেই X-রশ্মি শোষিত হবার সম্ভাব্যতা হঠাৎ খুব কমে যায়। অর্থাৎ যখন $\lambda = \lambda_K$ হয়, তখন $\mu/\rho$ এর মানে অবচ্ছিন্নতা দেখা যায়। অবশ্য এক্ষেত্রে আপতিত X-রশ্মি L খোলস থেকে ইলেকট্রন উচ্ছিন্ন করতে পারে, কারণ L খোলসে আবদ্ধ ইলেকট্রনের বন্ধন শক্তি $E_L$ এর মান $E_K$ অপেক্ষা কম হয় ( 6·7 অনুচ্ছেদ দ্রষ্টব্য )। $E_\nu$ যতক্ষণ $E_L$ অপেক্ষা বেশী থাকে, ততক্ষণ $E_\nu$ হ্রাস করার সংগে ( অর্থাৎ $\lambda$ বাড়ানর সংগে ) শোষণ গুণাংক $\mu/\rho$ বাড়তে থাকে ; অবশেষে যখন $E_\nu = E_L$ হয় তখন $\mu/\rho$ বৃহত্তম হয়। $E_\nu$ যখন $E_L$ অপেক্ষা কম হয়, তখন আপতিত X-রশ্মি আর L ইলেকট্রনগুলিকে পরমাণু থেকে উচ্ছিন্ন করতে পারে না। ফলে উক্ত X-রশ্মি শোষিত হবার সম্ভাব্যতা আবার হঠাৎ খুব কমে যায় ; অর্থাৎ $\mu/\rho$ এর লেখচিত্রে আবার একটি অবচ্ছিন্নতা দেখা যায়। প্রকৃতপক্ষে যেহেতু L খোলসে তিনটি খুব কাছাকাছি অবস্থিত শক্তিস্তর থাকে ($L_I$, $L_{II}$ এবং $L_{III}$), সেইজন্য $\mu/\rho$ এর লেখচিত্রেও পরপর তিনটি অবচ্ছিন্নতা দেখা যায়।

এখানে উল্লেখযোগ্য যে X-রশ্মির শোষণ বর্ণালীতে (Absorption Spectrum) দৃশ্যমান আলোকের শোষণ বর্ণালীর মত অবচ্ছিন্ন (Discrete) রেখাসমূহ দেখা যায় না। পরমাণুর আভ্যন্তরীণ ইলেকট্রন আপতিত X-রশ্মি শোষণ করে পরমাণু থেকে বিচ্ছিন্ন হতে পারে, এক কক্ষপথ থেকে অন্য কক্ষপথে সংক্রমণ করতে পারে না। কারণ বহিস্থ কক্ষপথগুলি ইলেকট্রন দ্বারা পূর্ণ থাকে। শোষিত রশ্মির শক্তি পরমাণুর মধ্যে ইলেকট্রনের বন্ধন শক্তির সমান বা অধিক হয়। সুতরাং শোষণ বর্ণালী নিরবচ্ছিন্ন প্রকৃতি সম্পন্ন হয় এবং উচ্চতর তরঙ্গদৈর্ঘ্যের দিকে এর একটি নির্দিষ্ট সীমা ( শোষণ-সীমা ) থাকে। এই শোষণ-সীমা (Absorption Edge) অপেক্ষা কম তরঙ্গদৈর্ঘ্য সম্পন্ন সব রশ্মিই শোষিত হয়।

যেহেতু K, L, M প্রভৃতি বিভিন্ন শোষণ-সীমার শক্তি উক্ত খোলসগুলিতে ইলেকট্রনের বন্ধন শক্তির সমান হয়, অতএব এই শোষণ-

সীমাগুলির শক্তির পার্থক্য থেকে বিভিন্ন X-রশ্মি শক্তিস্তরের পার্থক্য পাওয়া সম্ভব। বস্তুতঃ এই পদ্ধতিতেই বিভিন্ন মৌলের X-রশ্মি শক্তি-স্তরগুলি নির্ধারিত করা সম্ভব হয়।

## 6·10 : X-রশ্মির বিক্ষেপ ; টমসনের তত্ত্ব

যখন একগুচ্ছ X-রশ্মি কোন পদার্থের ভিতর দিয়ে পরিভ্রমণ করে, তখন উক্ত পদার্থের পরমাণুগুলির উপর এই রশ্মি সাধারণতঃ দুই ভাবে ক্রিয়া করে। প্রথমতঃ X-রশ্মির শক্তি পরমাণুর ইলেকট্রনগুলি কর্তৃক শোষিত হতে পারে, যার ফলে পূর্বে আলোচিত বিভিন্ন শোষণ সীমার উৎপত্তি হয়। দ্বিতীয়তঃ আপতিত X-রশ্মি পরমাণুর ইলেকট্রনগুলি দ্বারা বিক্ষিপ্ত (Scattered) হতে পারে। বিক্ষেপের ফলে আপতিত সমান্তরাল রশ্মিগুচ্ছ বিক্ষেপ কেন্দ্র (Scattering Centre) থেকে বিভিন্ন দিকে ছড়িয়ে পড়ে। কোন পদার্থের ভিতর দিয়ে পরিভ্রমণের সময় সমান্তরাল X-রশ্মিগুচ্ছের যে তীব্রতা হ্রাস দেখা যায় ( পূর্ব অনুচ্ছেদ দ্রষ্টব্য ), তা উপরোক্ত দুই প্রকার প্রক্রিয়ার ফলে ঘটে। এই হ্রাস নির্দেশ করা হয় 'নির্বাণ-গুণাংক' (Extinction Coefficient) নামক সংখ্যার সাহায্যে। যদি $\tau$ হয় নির্বাণ-গুণাংক, তাহলে লেখা যায়

$$\tau = \eta + \sigma$$

এখানে $\sigma$ হচ্ছে বিক্ষেপ গুণাংক (Scattering Coefficient) এবং $\mu$ হচ্ছে শোষণ গুণাংক। কাজেই ভর-নির্বাণ গুণাংক $\tau/\rho$ হচ্ছে ভর-বিক্ষেপ গুণাংক $\sigma/\rho$ এবং ভর-শোষণ গুণাংক $\mu/\rho$ সংখ্যা দুটির যোগফলের সমান ঃ

$$\frac{\tau}{\rho} = \frac{\sigma}{\rho} + \frac{\mu}{\rho}$$

প্রকৃতপক্ষে আপতিত X-রশ্মি বিভিন্ন পরমাণু থেকে বিক্ষিপ্ত হয়। যদি বিক্ষেপকের (Scatterer) পরমাণবিক ভার $M$ এবং অ্যাভোগেড্রো সংখ্যা $N$ হয় তাহলে প্রতি একক ভরে বর্তমান পরমাণুর সংখ্যা $N/M$ হয়। অতএব একক আয়তনে, অর্থাৎ $\rho$ ভরে বর্তমান পরমাণুর সংখ্যা $n_a = \rho N/M$ হয়। কাজেই $dx$ বেধ সম্পন্ন এবং একক প্রস্থচ্ছেদ বিশিষ্ট বিক্ষেপকের মধ্যে পরমাণুর সংখ্যা $N\rho dx/M$ হয়। যেহেতু বিক্ষেপ হচ্ছে একটি পরমাণবিক প্রক্রিয়া সুতরাং $dx$ বেধ সম্পন্ন বিক্ষেপকের মধ্য দিয়ে

যাবার সময় X-রশ্মিগুচ্ছের বিক্ষেপের সম্ভাব্যতা (Probability of Scattering) নির্ভর করে একক প্রস্থচ্ছেদ বিশিষ্ট এবং $dx$ বেধ সম্পন্ন শোষকের মধ্যে বর্তমান পরমাণুর সংখ্যার উপর।

অর্থাৎ

$$\frac{dI}{I} \propto \frac{N\rho}{M} dx$$

এখানে $I$ হচ্ছে আপতিত রশ্মির তীব্রতা এবং $dI$ হচ্ছে বিক্ষেপের ফলে তীব্রতার হ্রাস। অতএব

$$\frac{dI}{I} = -\sigma_a \frac{N\rho}{M} dx \tag{6·13}$$

এখানে $\sigma_a$ একটি ধ্রুবক। আবার (6·10) সমীকরণের অনুরূপে আমরা লিখতে পারি

$$\frac{dI}{I} = -\sigma\, dx \tag{6·14}$$

এখানে $\sigma$ হচ্ছে পূর্বে আলোচিত বিক্ষেপ গুণাংক। সমীকরণ (6·13) এবং (6·14) থেকে পাওয়া যায়

$$\sigma = \sigma_a \frac{N\rho}{M}$$

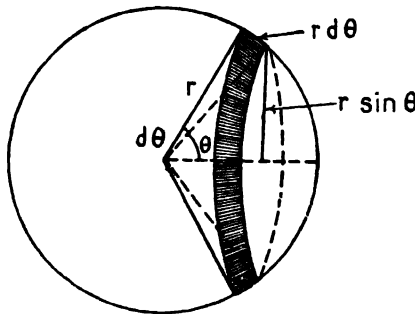
অথবা
$$\sigma_a = \frac{\sigma M}{N\rho} = \frac{\sigma}{n_a} \tag{6·15}$$

$\sigma_a$ সংখ্যাটিকে বলা যায় 'পরমাণবিক বিক্ষেপ গুণাংক' (Atomic Scattering Coefficient)। যেহেতু $\sigma$ হচ্ছে দৈর্ঘ্যের বিপরীত মাত্রা সম্পন্ন একটি রাশি এবং $n_a$ হচ্ছে আয়তনের বিপরীত মাত্রা সম্পন্ন একটি রাশি, অতএব $\sigma_a$ সংখ্যাটি হচ্ছে ক্ষেত্রফলের মাত্রা (Dimension) বিশিষ্ট একটি রাশি। সনাতন তড়িৎচুম্বকীয় তত্ত্ব অনুসারে আপতিত X-রশ্মি তরঙ্গের তড়িৎক্ষেত্র $E$-এর ক্রিয়ার জন্য পরমাণু মধ্যস্থ একটি ইলেকট্রনের উপর $eE$ বল প্রযুক্ত হয়। ফলে ইলেকট্রনটির ত্বরণ হয়

$$f = \frac{eE}{m}$$

ইলেকট্রনটি আপতিত রশ্মির কম্পাংক অনুযায়ী বলাধীন কম্পন গতি (Forced Vibration) প্রাপ্ত হয়। সনাতন তড়িৎচুম্বকীয় তত্ত্ব অনুসারে এইরকম কম্পনশীল ইলেকট্রন তড়িৎচুম্বকীয় বিকিরণ নিঃসৃত করে। এই বিকিরণই হচ্ছে 'বিক্ষিপ্ত বিকিরণ' (Scattered Radiation)। এই বিক্ষিপ্ত বিকিরণ বিক্ষেপ কেন্দ্র থেকে বিভিন্ন দিকে নিঃসৃত হয় এবং এর কম্পাংক বা তরঙ্গদৈর্ঘ্য আপতিত রশ্মির কম্পাংক বা তরঙ্গদৈর্ঘ্যের সমান হয়। যদি আপতিত বিকিরণের প্রভাবে কম্পনশীল ইলেকট্রনের বেগ আলোকের বেগ $c$ এর তুলনায় খুব কম হয়, তাহলে তড়িৎচুম্বকীয় তত্ত্ব থেকে দেখান যায় যে বিক্ষেপক থেকে $r$ দূরত্বে অবস্থিত কোন বিন্দুতে বিক্ষেপকের একক আয়তন থেকে বিক্ষিপ্ত X-রশ্মির তীব্রতা হয়

$$I_s = I\frac{ne^4}{2r^2m^2c^4}\,(1+\cos^2\theta) \tag{6·16}$$

এখানে $\theta$ হচ্ছে আপতিত রশ্মি ও বিক্ষিপ্ত রশ্মির অন্তর্গত কোণ ; $n$ হচ্ছে বিক্ষেপকের একক আয়তনে বর্তমান ইলেকট্রন সংখ্যা। $I$ হচ্ছে আপতিত রশ্মির তীব্রতা। সমীকরণ (6·16) প্রতিপন্ন করতে অনুমান করা হয় যে বিভিন্ন ইলেকট্রন থেকে বিক্ষিপ্ত তরঙ্গগুলি পরস্পরের থেকে সম্পূর্ণ স্বতন্ত্র। কাজেই তাদের মধ্যে কোনরূপ ব্যতিচার (Interference) হয় না। তাছাড়া যদিও ইলেকট্রনগুলি প্রকৃতপক্ষে পরমাণুর মধ্যে আবদ্ধ থাকে, এই তত্ত্বে কল্পনা করা হয় যে সেগুলি যেন সম্পূর্ণ মুক্ত অবস্থায় থাকে।

চিত্র 6·14

ঘনকোণের চিত্ররূপ।

(6·16) সমীকরণকে সমাকলন করলে মোট বিক্ষিপ্ত শক্তির পরিমাণ পাওয়া যায়। যদি বিক্ষেপকের আকারের তুলনায় $r$ খুব বড় হয়, তাহলে

বিক্ষেপককে একটি বিন্দু-সদৃশ বলে কল্পনা করা যায়। যদি এক্ষেত্রে বিক্ষেপককে কেন্দ্র করে $r$ ব্যাসার্ধের একটি গোলক আঁকা যায় এবং এই গোলকের উপর $\theta$ এবং $\theta+d\theta$ কোণ দুটির মধ্যে একটি বলয় (Ring) অংকিত করা যায়, তাহলে বলয়টির ক্ষেত্রফল হবে $dS=2\pi r^2 \; sin \; \theta d\theta$ ( 6·14 চিত্র দ্রষ্টব্য )। কাজেই প্রতি সেকেণ্ডে মোট বিক্ষিপ্ত শক্তির পরিমাণ হয়

$$W_s=\int I_s dS = I \; \frac{ne^4}{2r^2m^2c^4}\cdot 2\pi\int_0^\pi (1+\cos^2\theta)r^2 \sin\theta d\theta$$

অর্থাৎ
$$W_s=\frac{8\pi}{3}n\left(\frac{e^2}{mc^2}\right)^2 I \tag{6·17}$$

সমীকরণ (6·13) এবং (6·17) থেকে পাওয়া যায় ( যখন $dx=1$ হয়)

$$\sigma=\frac{W_s}{I}=\frac{8\pi}{3}n\left(\frac{e^2}{mc^2}\right)^2 \tag{6·18}$$

$\sigma$ হচ্ছে 'বিক্ষেপ গুণাংক'। (6·18) সমীকরণকে বলা হয় 'টমসন বিক্ষেপ ফর্মুলা' (Thomson Scattering Formula)। এই জাতীয় বিক্ষেপকে বলা হয় 'টমসন বিক্ষেপ' (Thomson Scattering)। যেহেতু এ ক্ষেত্রে বিক্ষিপ্ত বিকিরণের কম্পাংক অপরিবর্তিত থাকে, এই বিক্ষেপকে অপরিবর্তিত বিক্ষেপও (Unmodified Scattering) বলা হয়।

সমীকরণ (6·14) থেকে প্রতিটি ইলেকট্রনের জন্য বিক্ষেপ গুণাংকের মান পাওয়া যায় ঃ

$$\sigma_e=\frac{\sigma}{n}=\frac{8\pi}{3}\left(\frac{e^2}{mc^2}\right)^2=6·66\times10^{-25} \text{ সেমি}^2 \tag{6·19}$$

$\sigma_e$ হচ্ছে একটি মৌলিক ধ্রুবক (Fundamental Constant), কারণ এর মান কেবল $e$, $m$ এবং $c$, এই তিনটি মৌলিক ধ্রুবকের উপর নির্ভর করে। $\sigma_e$ সংখ্যাটির একটা জ্যামিতিক ব্যাখ্যা দেওয়া সম্ভব। যদি আপতিত সমান্তরাল রশ্মিগুচ্ছের সংগে লম্বভাবে বিন্যস্ত একটি একক ক্ষেত্রফল বিশিষ্ট সমতল কল্পনা করা যায়, তাহলে তার উপর আপতিত বিকিরণের শক্তির পরিমাণ $I$ হয়। এই শক্তির যে অংশ একটি মাত্র ইলেকট্রন দ্বারা বিক্ষিপ্ত হয় তার মান ($\sigma_e I$) হয়। সুতরাং আমরা বলতে পারি যে $\sigma_e$

ক্ষেত্রফলের উপর যে পরিমাণ তড়িৎচুম্বকীয় শক্তি আপতিত হয় সেই পরিমাণ শক্তিই প্রতিটি ইলেকট্রন থেকে বিক্ষিপ্ত হয়। যদি ইলেকট্রনগুলিকে $r_e$ ব্যাসার্ধ সম্পন্ন এক একটি ক্ষুদ্র গোলক বলে কল্পনা করা যায়, তাহলে মনে করা যেতে পারে প্রতিটি ইলেকট্রন যেন আপতিত রশ্মির পথে $\pi r_e^2$ প্রস্থচ্ছেদ সম্পন্ন এক একটি প্রতিবন্ধক সৃষ্টি করে। স্পষ্টতঃ

$$\pi r_e^2 = \frac{8\pi}{3}\left(\frac{e^2}{mc^2}\right)^2$$

অথবা
$$r_e = \sqrt{\frac{8}{3}}\, r_0 \tag{6.20}$$

$r_0 = e^2/mc^2$ সংখ্যাটিকে বলা হয় 'সনাতন ইলেকট্রন ব্যাসার্ধ' (Classical Electron Radius)। এর মান হচ্ছে $r_0 = e^2/mc^2 = 2{\cdot}8 \times 10^{-13}$ সেমি।

বিক্ষেপ গুণাংক পরিমাপ করলে, সমীকরণ (6·18) থেকে বিক্ষেপকের একক আয়তনে ইলেকট্রন সংখ্যা নিরূপণ করা যায়। বার্ক্‌লা (Barkla) নামক বৃটিশ বিজ্ঞানী সর্বপ্রথম এইরূপ পরিমাপ করেন ১৯১১ সালে। পরে আরও অনেকে অনুরূপ পরিমাপ করেন। উদাহরণস্বরূপ, কার্বনের ভর-বিক্ষেপ গুণাংকের পরীক্ষালব্ধ মান পাওয়া যায়

$$(\sigma/\rho) = 0{\cdot}2$$

সমীকরণ (6·19) থেকে পাওয়া যায়

$$n = \frac{3\sigma}{8\pi}\cdot\frac{1}{(e^2/mc^2)^2} = \frac{\sigma}{6{\cdot}66 \times 10^{-25}} = \frac{0{\cdot}2\rho}{6{\cdot}66 \times 10^{-25}}$$
$$= 3 \times 10^{23}\rho$$

আবার এক ঘন-সেণ্টিমিটার আয়তনে বর্তমান কার্বন পরমাণুর সংখ্যা হচ্ছে

$$n_c = \frac{6{\cdot}02 \times 10^{23}}{12} \times \rho = 5{\cdot}1 \times 10^{22}\rho$$

অতএব প্রতি কার্বন পরমাণুর মধ্যে বর্তমান ইলেকট্রনের সংখ্যা হচ্ছে

$$Z = \frac{n}{n_c} = \frac{3 \times 10^{23}\rho}{5{\cdot}1 \times 10^{22}\rho} \simeq 6$$

এই সংখ্যা মেণ্ডেলিয়ভের পর্যায় সারণীতে কার্বনের অবস্থানের ক্রমিক সংখ্যার সমান। অর্থাৎ এর থেকে প্রমাণিত হয় যে কার্বনের পরমাণবিক সংখ্যা

(Atomic Number) এর পরমাণুর অন্তর্গত ইলেকট্রনের সংখ্যার সমান। এই সিদ্ধান্ত অন্যান্য পরমাণুর ক্ষেত্রেও সত্য বলে প্রমাণিত হয়েছে। পরবর্তী যুগে $\alpha$-কণিকার বিক্ষেপ (Scattering) সম্বন্ধীয় পরীক্ষা থেকে প্রমাণিত হয় যে পরমাণু কেন্দ্রকের আধানও পরমাণবিক সংখ্যার সমান। অর্থাৎ কেন্দ্রকের আধান আর পরমাণুর অন্তর্গত ইলেকট্রনের আধান যে পরস্পরের সমান তা উপরোক্ত দুটি পরীক্ষা থেকে প্রমাণিত হয়।

এখানে উল্লেখযোগ্য যে X-রশ্মি বিক্ষেপের উপরোক্ত তত্ত্ব কেবল খুব নিম্ন পরমাণবিক সংখ্যা সম্পন্ন মৌলের ক্ষেত্রেই (যথা হাইড্রোজেন, হিলিয়াম প্রভৃতি) সঠিক ভাবে প্রযোজ্য। এই সব ক্ষেত্রেও আপতিত X-রশ্মির তরঙ্গদৈর্ঘ্য 0·2 অ্যাং অপেক্ষা বেশী হওয়া প্রয়োজন। কারণ টমসনের বিক্ষেপ তত্ত্ব অপেক্ষাকৃত দীর্ঘ তরঙ্গদৈর্ঘ্য সম্পন্ন রশ্মির ক্ষেত্রেই প্রযোজ্য। বিক্ষেপকের পরমাণবিক সংখ্যা যত উচ্চ হয়, পরিমিত বিক্ষেপ গুণাংক (6·18) সমীকরণ থেকে প্রাপ্ত মান অপেক্ষা তত উচ্চতর হয়। এইরূপ অতিরিক্ত বিক্ষেপের কারণ হচ্ছে যে উচ্চ পরমাণবিক সংখ্যা সম্পন্ন পরমাণুর মধ্যে ইলেকট্রনগুলির পারস্পরিক দূরত্ব আপতিত X-রশ্মির তরঙ্গদৈর্ঘ্যের সংগে তুলনীয় হয়। ফলে বিভিন্ন ইলেকট্রন থেকে বিক্ষিপ্ত বিকিরণকে পরস্পর থেকে স্বতন্ত্র বলে টমসনের তত্ত্বে যে অনুমান করা হয় তা যুক্তিসংগত বলে মনে করা যেতে পারে না। বস্তুতঃ এক্ষেত্রে বিভিন্ন ইলেকট্রন থেকে বিক্ষিপ্ত তরঙ্গের মধ্যে ব্যতিচার (Interference) হয়। ইলেকট্রনগুলির পারস্পরিক দূরত্বের তুলনায় তরঙ্গদৈর্ঘ্য যদি খুব বেশী দীর্ঘ হয় তাহলে এই ব্যতিচার গঠনমূলক (Constructive) হয়। ফলে বিক্ষিপ্ত তরঙ্গগুলির বিস্তারের (Amplitude) লব্ধি (Resultant) টমসন তত্ত্ব থেকে প্রাপ্ত বিস্তারের লব্ধির তুলনায় অনেকে অনেক উচ্চতর হয়।

খুব ক্ষুদ্র তরঙ্গদৈর্ঘ্যের ক্ষেত্রে ($\lambda < 0{\cdot}2$ অ্যাং) পরিমিত বিক্ষেপ গুণাংক $\sigma$ সব মৌলের ক্ষেত্রেই সমীকরণ (6·18) থেকে প্রাপ্ত মান অপেক্ষা কম হয়। এই হ্রাস অবশ্য সনাতন তত্ত্ব থেকে ব্যাখ্যা করা যায় না। এর ব্যাখ্যার জন্য কোয়ানটাম তত্ত্বের সাহায্য নিতে হয়।

এখানে উল্লেখযোগ্য যে সমীকরণ (6·16) থেকে বিভিন্ন দিকে বিক্ষিপ্ত X-রশ্মির তীব্রতার পরিমাণ পাওয়া যায়। অপেক্ষাকৃত দীর্ঘতর তরঙ্গদৈর্ঘ্যের ক্ষেত্রে এই সমীকরণের সত্যতা পরীক্ষা দ্বারা প্রমাণিত হয়েছে—বিশেষতঃ উচ্চতর বিক্ষেপ কোণের ক্ষেত্রে ($\theta > 45°$)। কিন্তু খুব ক্ষুদ্র তরঙ্গদৈর্ঘ্যের

ক্ষেত্রে বিভিন্ন দিকে বিক্ষিপ্ত বিকিরণের তীব্রতা সমীকরণ (6·16) থেকে প্রাপ্ত তীব্রতা অপেক্ষা অনেক কম হয়। ক্ষুদ্রতর তরঙ্গদৈর্ঘ্যের ক্ষেত্রে সনাতন বিক্ষেপ তত্ত্বের এই ত্রুটি দূর করবার জন্যও কোয়ানটাম তত্ত্বের সাহায্য নিতে হয়।

## 6·11 : কম্পটন বিক্ষেপ

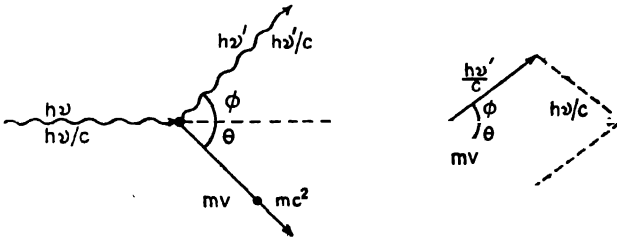
১৯২৪ সালে প্রখ্যাত আমেরিকান বিজ্ঞানী কম্পটন (A. H. Compton) কার্বন থেকে একবর্ণী X-রশ্মি বিক্ষেপ পরীক্ষা অনুষ্ঠিত করতে গিয়ে লক্ষ্য করেন যে নির্দিষ্ট দিকে বিক্ষিপ্ত রশ্মির মধ্যে দুটি ভিন্ন তরঙ্গদৈর্ঘ্য সম্পন্ন বিকিরণ থাকে। তার মধ্যে একটির তরঙ্গদৈর্ঘ্য আদি বিকিরণের তরঙ্গদৈর্ঘ্যের সমান হয়। অন্যটির তরঙ্গদৈর্ঘ্য অপেক্ষাকৃত দীর্ঘতর। অর্থাৎ শেষোক্ত বিকিরণের কম্পাংক আদি কম্পাংক অপেক্ষা কম হয়। প্রথমটির উদ্ভব হয় পূর্বে আলোচিত অপরিবর্তিত স্থিতিস্থাপক (Elastic) বিক্ষেপের ফলে। দ্বিতীয় ক্ষেত্রে বিক্ষেপকে বলা যায় অস্থিতিস্থাপক বিক্ষেপ (Inelastic Scattering)। এক্ষেত্রে বিক্ষিপ্ত বিকিরণের কম্পাংক পরিবর্তিত হয়ে যায়। এইরূপ বিক্ষেপকে বলা হয় 'কম্পটন বিক্ষেপ' বা 'কম্পটন ক্রিয়া' (Compton Effect)।

এই ক্রিয়া ব্যাখ্যা করার জন্য কম্পটন আলোকের ফোটন প্রকৃতি অনুমান করে একটি তত্ত্ব উদ্ভাবিত করেন। তাঁর অনুমান অনুসারে ফোটনের শুধু যে $h\nu$ পরিমাণ শক্তি থাকে তা নয়, এর কিছু পরিমাণ ভরবেগও থাকে। ম্যাক্সওয়েলের তড়িৎচুম্বকীয় তত্ত্বের অন্যতম সিদ্ধান্ত হচ্ছে যে তড়িৎচুম্বকীয় বিকিরণের ভরবেগ আছে। যদি নির্দিষ্ট দিকে একক ক্ষেত্রফলের ভিতর দিয়ে প্রতি সেকেণ্ডে প্রবাহিত বিকিরণের শক্তি, অর্থাৎ 'পয়্‌নটিং ভেক্টর' (Poynting Vector) হয় $N$, তাহলে এই ভরবেগ হয় $N/c^2$ ; এখানে $c$ হচ্ছে আলোকের বেগ। আপেক্ষিকতাবাদ থেকেও অনুরূপ সিদ্ধান্ত করা হয়। উক্ত তত্ত্ব অনুসারে $v$ বেগে ভ্রাম্যমাণ একটি কণিকার মোট শক্তি হয় ( 8·26 সমীকরণ দ্রষ্টব্য )

$$E = mc^2 = m_0 c^2 / \sqrt{1 - v^2/c^2}$$

এখানে $m_0$ হচ্ছে কণিকাটির স্থির-ভর (Rest Mass) এবং $m$ হচ্ছে এর গতিশীল অবস্থার ভর। উপরের সমীকরণ থেকে $m = E/c^2$ লেখা যায়। আইনষ্টাইন কল্পিত ফোটনের যদিও কোন স্থির-ভর নাই, তাহলেও উপরের

গাণিতিক সম্পর্কের অনুরূপে আমরা মনে করতে পারি যে গতিশীল অবস্থায় $h\nu$ শক্তি সম্পন্ন ফোটনেরও যেন একটা ভর থাকে, যার মান $m = E/c^2 = h\nu/c^2$ লেখা যায়। যেহেতু ফোটনের বেগ $c$, অতএব $mc = (E/c^2)c = h\nu/c$ হবে এর ভরবেগ।

এই ফোটন বা আলোক কণিকা যখন একটি মুক্ত এবং স্থির ইলেকট্রনের সংগে সংঘাত প্রাপ্ত হয়, তখন ইলেকট্রনটি কিছু পরিমাণ গতিশক্তি অর্জন করে, যার ফলে ফোটনের শক্তি এবং ভরবেগ কিছুটা কমে যায়। মনে করা যাক আঘাত প্রাপ্ত ইলেকট্রন আপতিত রশ্মির সংগে $\theta$ কোণে এবং $v$ বেগে অগ্রসর হয় এবং ফোটনটি আপতিত রশ্মির সংগে $\phi$ কোণে বিক্ষিপ্ত হয়। মনে করা যাক যে বিক্ষিপ্ত ফোটনের কম্পাংক $\nu'$ ; সুতরাং এর শক্তি $h\nu'$ হবে। যেহেতু সংঘাতের ফলে ফোটনটি কিছু পরিমাণ শক্তি হারায়, অতএব $\nu' < \nu$

চিত্র 6·15

কম্পটন বিক্ষেপের চিত্ররূপ।

হবে। এইরূপ সংঘাতের গাণিতিক বিশ্লেষণ করা যায় 'শক্তি-সংরক্ষণ' এবং 'ভরবেগ সংরক্ষণ' সূত্র দুটি প্রয়োগ করে। সংঘাতের পর বিক্ষিপ্ত ফোটনের ভরবেগ $h\nu'/c$ হয়। আপেক্ষিকতাবাদ অনুযায়ী আঘাত প্রাপ্ত ইলেকট্রনের গতিশক্তি হয় $T_e = (mc^2 - m_0c^2)$ এবং এর ভরবেগ হয় $mv = m\beta c$ ; এখানে $\beta = v/c$; এবং $m = m_0/\sqrt{1-\beta^2}$ হচ্ছে $v$ বেগে ভ্রাম্যমাণ ইলেকট্রনের ভর ; $m_0$ হচ্ছে ইলেকট্রনের স্থির-ভর। শক্তি সংরক্ষণ সূত্র থেকে পাওয়া যায়

$$h\nu = h\nu' + T_e = h\nu' + \frac{m_0c^2}{\sqrt{1-\beta^2}} - m_0c^2 \qquad (6·21)$$

আপতিত ফোটনের গতিপথের দিকে এবং এই গতিপথের অভিলম্বে ভরবেগ সংরক্ষণ সূত্র প্রয়োগ করলে পাওয়া যায় ( 6·15 চিত্র দ্রষ্টব্য ) ঃ

$$\frac{h\nu}{c}=\frac{h\nu'}{c}\cos\phi+\frac{m_0\beta c}{\sqrt{1-\beta^2}}\cos\theta \qquad (6\cdot22)$$

$$0=\frac{h\nu'}{c}\sin\phi-\frac{m_0\beta c}{\sqrt{1-\beta^2}}\sin\theta \qquad (6\cdot23)$$

সমীকরণ (6·22) এবং (6·23) থেকে পাওয়া যায়

$$\frac{m_0\beta c}{\sqrt{1-\beta^2}}\cos\theta=\frac{h\nu}{c}-\frac{h\nu'}{c}\cos\phi$$

$$\frac{m_0\beta c}{\sqrt{1-\beta^2}}\sin\theta=\frac{h\nu'}{c}\sin\phi$$

উপরের সমীকরণ দুটির বর্গ নির্ণয় করে যোগ করলে পাওয়া যায়

$$\frac{m_0^2\beta^2c^2}{1-\beta^2}=\frac{h^2\nu^2}{c^2}+\frac{h^2\nu'^2}{c^2}-\frac{2h^2\nu\nu'}{c^2}\cos\phi \qquad (6\cdot24)$$

সমীকরণ (6·21) থেকে বর্গ নির্ণয় করে পাওয়া যায়

$$\frac{m_0^2c^4}{1-\beta^2}=(h\nu-h\nu'+m_0c^2)^2$$
$$=h^2\nu^2+h^2\nu'^2-2h^2\nu\nu'+m_0^2c^4+2h(\nu-\nu')m_0c^2$$

দুই দিকে $c^2$ দিয়ে ভাগ করে পাওয়া যায়

$$\frac{m_0^2c^2}{1-\beta^2}-m_0^2c^2=\frac{m_0^2\beta^2c^2}{1-\beta^2}$$
$$=\frac{h^2\nu^2}{c^2}+\frac{h^2\nu'^2}{c^2}-\frac{2h^2\nu\nu'}{c^2}+2m_0h(\nu-\nu') \qquad (6\cdot25)$$

সমীকরণ (6·25) থেকে সমীকরণ (6·24) বিয়োগ করলে পাওয়া যায় ঃ

$$0=2m_0h\,(\nu-\nu')-\frac{2h^2\nu\nu'}{c^2}(1-\cos\phi)$$

$$\frac{\nu-\nu'}{\nu\nu'}=\frac{h}{m_0c^2}(1-\cos\phi)$$

অথবা $$c\left(\frac{1}{\nu'}-\frac{1}{\nu}\right)=\frac{h}{m_0 c}(1-\cos\phi)$$

আপতিত রশ্মির তরঙ্গদৈর্ঘ্য $\lambda=c/\nu$ এবং বিক্ষিপ্ত রশ্মির তরঙ্গদৈর্ঘ্য $\lambda'=c/\nu'$ হয়। এছাড়া আমরা যদি লিখি

$$\lambda_c=\frac{h}{m_0 c}=\text{কম্পটন তরঙ্গদৈর্ঘ্য} \qquad (6{\cdot}26)$$

তাহলে পাওয়া যায়

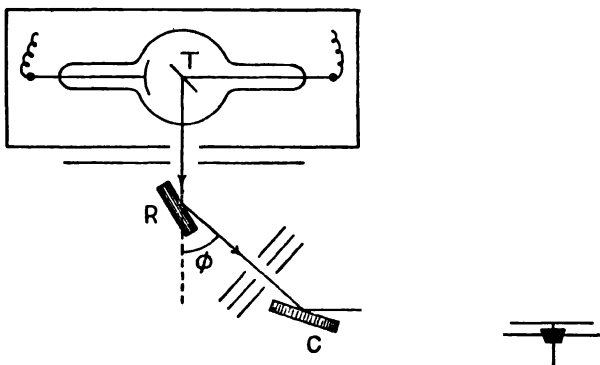
$$\Delta\lambda=\lambda'-\lambda=2\lambda_c\sin^2\frac{\phi}{2} \qquad (6{\cdot}27)$$

এখানে $\Delta\lambda=\lambda'-\lambda$ হচ্ছে বিক্ষেপের ফলে তরঙ্গদৈর্ঘ্যের পরিবর্তন। সমীকরণ (6·27) থেকে দেখা যায় যে $\Delta\lambda$ আপতিত রশ্মির তরঙ্গদৈর্ঘ্যের উপর নির্ভর করে না, শুধু $\phi$ বিক্ষেপ কোণের উপর নির্ভর করে। (6·26) সমীকরণে $h$, $m_0$ এবং $c$ সংখ্যাগুলির মান বসালে পাওয়া যায় $\lambda_c=0{\cdot}0242$ অ্যাংস্ট্রম।

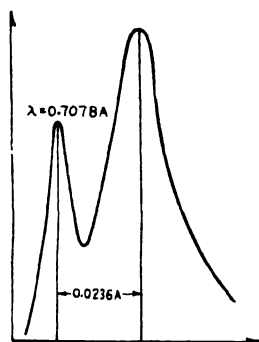
সমীকরণ (6·27) থেকে দেখা যায় যে আপতন দিকের অভিমুখে বিক্ষেপ ঘটলে ($\phi=0$), বিক্ষিপ্ত রশ্মির তরঙ্গদৈর্ঘ্য পরিবর্তিত হয় না। যখন আপতিত রশ্মির বিপরীত দিকে বিক্ষেপ হয়, অর্থাৎ যখন $\phi=\pi$ হয়, তখন বিক্ষিপ্ত রশ্মির তরঙ্গদৈর্ঘ্যের পরিবর্তন সর্বাপেক্ষা বেশী হয়। এক্ষেত্রে $\Delta\lambda=2\lambda_c$ হয়।

কম্পটন নিম্নে বর্ণিত পরীক্ষার দ্বারা (6·27) সমীকরণের সত্যতা প্রমাণিত করেন।

(6·16) চিত্রে প্রদর্শিত X-রশ্মি আধারের মধ্যে T হচ্ছে একটি মলিবডেনাম ($Z=42$) ধাতু নির্মিত লক্ষ্যবস্তু (Target)। T থেকে নিঃসৃত একবর্ণী মলিবডেনাম $K_\alpha$ বিকিরণ R কার্বন বিক্ষেপকের (Scatterer) উপর আপতিত হয়ে $\theta$ কোণে বিক্ষিপ্ত হয়। বিক্ষেপের পর কয়েকটি রেখাছিদ্রের (Slit) ভিতর দিয়ে পার হয়ে বিক্ষিপ্ত রশ্মি একটি ব্র্যাগ বর্ণালীমাপক (Bragg Spectrometer) যন্ত্রের অন্তর্ভুক্ত C কেলাসের উপর আপতিত হয়। এই কেলাস থেকে ব্যবর্তিত (Diffracted) রশ্মি I আয়নন কক্ষে (Ionization Chamber) প্রবেশ করে, যার সাহায্যে উক্ত রশ্মির তীব্রতা মাপা যায়। এই ব্যবস্থার দ্বারা R

থেকে বিক্ষিপ্ত রশ্মির তরঙ্গদৈর্ঘ্য মাপা যায়। কম্পটন তাঁর পরীক্ষায় বিক্ষিপ্ত রশ্মির মধ্যে দুটি বিভিন্ন তরঙ্গদৈর্ঘ্য সম্পন্ন বিকিরণের নিদর্শন পান। 90°

চিত্র 6·16

কম্পটন বিক্ষেপ পর্যবেক্ষণের জন্য পরীক্ষা ব্যবস্থা।

কোণে বিক্ষিপ্ত বিকিরণের তরঙ্গদৈর্ঘ্য পরিমাপ করে এদের মধ্যে একটির তরঙ্গ-দৈর্ঘ্য আপতিত মলিবডেনাম $K_{\alpha}$ রশ্মির তরঙ্গদৈর্ঘ্যের সমান (0·708 অ্যাং)

চিত্র 6·17

কার্বন কর্তৃক 90° কোণে বিক্ষিপ্ত X-রশ্মির তরঙ্গদৈর্ঘ্যের সংগে তীব্রতা পরিবর্তনের লেখচিত্র।

পাওয়া যায়। অন্যটির তরঙ্গদৈর্ঘ্য পাওয়া যায় 0·730 অ্যাং (6·17 চিত্র দ্রষ্টব্য)। দুটির মধ্যে তরঙ্গদৈর্ঘ্য ব্যবধান $\Delta\lambda = 0·022$ অ্যাং সমীকরণ

(6·27) থেকে $\phi = 90^\circ$ বিক্ষেপ কোণের ক্ষেত্রে নিরূপিত ব্যবধানের ( $\Delta\lambda = 0·024$ অ্যাং ) প্রায় সমান হয়। বিভিন্ন তরঙ্গদৈর্ঘ্য সম্পন্ন একবর্ণী X-রশ্মি বিক্ষিপ্ত করে উপরোক্ত তরঙ্গদৈর্ঘ্য ব্যবধান $\Delta\lambda$ পরিমাপ করা হয়েছে। সব ক্ষেত্রেই এই ব্যবধান সমান পাওয়া যায়। অর্থাৎ $\Delta\lambda$ আপতিত রশ্মির তরঙ্গদৈর্ঘ্যের উপর নির্ভর করে না।

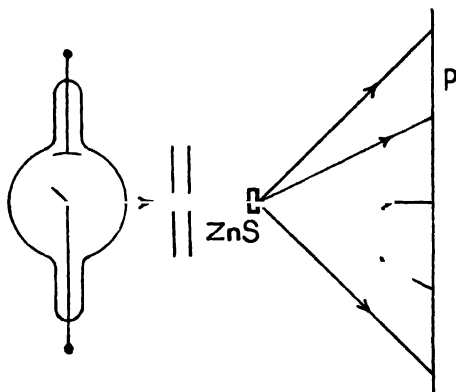
এখানে বিশেষভাবে প্রণিধান যোগ্য যে কম্পটন ক্রিয়া খুব সুস্পষ্টভাবে আলোকের কণিকাস্বরূপ উদ্ঘাটিত করে। X-রশ্মি ছাড়া পরমাণু কেন্দ্রক থেকে নিঃসৃত গামা রশ্মির ক্ষেত্রেও কম্পটন বিক্ষেপ দেখা যায়।

কম্পটন বিক্ষেপের সময় যে ইলেকট্রনটি প্রতিক্ষিপ্ত (Recoil) হয়, তার শক্তি সহজেই নির্ণয় করা যায়। এই নির্ণীত শক্তি এবং পরীক্ষার দ্বারা পরিমিত শক্তির মধ্যে ভাল সংগতি পাওয়া যায়। তাছাড়া বোথে এবং গাইগার (Bothe and Geiger) নামক জার্মান বিজ্ঞানীদ্বয় বিক্ষিপ্ত X-রশ্মি ফোটন এবং প্রতিক্ষিপ্ত ইলেকট্রন নিঃসরণের সমকালীনত্ব পরীক্ষার দ্বারা দেখাতে সমর্থ হন। এইভাবে কম্পটন তত্ত্বের মৌলিক অনুমানগুলির সত্যতা সুস্পষ্টভাবে প্রমাণিত হয়েছে।

### 6·12 : X-রশ্মির ব্যবর্তন

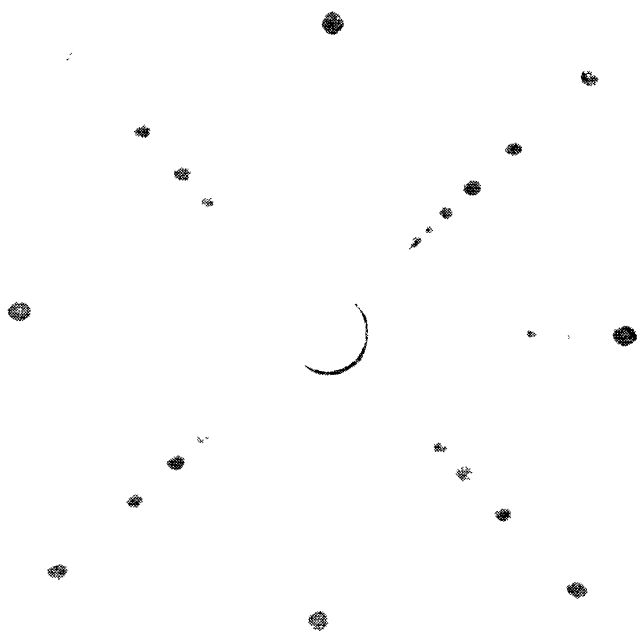
X-রশ্মি আবিষ্কারের অল্পদিনের মধ্যেই প্রতীয়মান হয় যে এই রশ্মি এক প্রকার তড়িৎচুম্বকীয় বিকিরণ, যার তরঙ্গদৈর্ঘ্য সাধারণ দৃশ্যমান আলোকের তরঙ্গদৈর্ঘ্য অপেক্ষা অনেক ক্ষুদ্রতর। আলোকের তরঙ্গদৈর্ঘ্যের সঠিক পরিমাপ করা হয় ব্যবর্তন ঝাঁঝরির (Diffraction Grating) সাহায্যে ব্যবর্তন নকশা (Pattern) উৎপন্ন করে। একথা সুবিদিত যে ব্যবর্তন নকশা উৎপন্ন করবার জন্য ব্যবহৃত ব্যবর্তন ঝাঁঝরির উপরকার রেখাগুলির পারস্পরিক ব্যবধান আলোকের তরঙ্গদৈর্ঘ্যের সংগে সমমাত্রিক হওয়া প্রয়োজন। প্রাথমিক যুগে অতি সংকীর্ণ রেখাছিদ্র ব্যবহার করে X-রশ্মির ব্যবর্তন উৎপন্ন করার প্রচেষ্টা হয়। এইসব প্রাথমিক পরীক্ষা থেকে কোন সঠিক পরিমাপ সম্ভব না হলেও বোঝা যায় যে X-রশ্মির তরঙ্গদৈর্ঘ্য $10^{-8}$ থেকে $10^{-9}$ সেমির মত হয়।

১৯১২ সালে জার্মান বিজ্ঞানী ফন্ লাওয়ে (Von Laue) অনুমান করেন যে কেলাসিত পদার্থের সাহায্যে অপেক্ষাকৃত অনেক সহজে X-রশ্মির ব্যবর্তন উৎপন্ন করা সম্ভব হতে পারে। একক আয়তনে অবস্থিত অণুর

সংখ্যা থেকে লাওয়ে কেলাসের অভ্যন্তরের পরমাণুগুলির পারস্পরিক দূরত্ব নির্ণয় করেন। তিনি দেখান যে এই দূরত্ব প্রায় $10^{-7}$ থেকে $10^{-8}$ সেমির মত হয়; অর্থাৎ X-রশ্মির তরঙ্গদৈর্ঘ্যের সংগে তুলনীয় হয়। কেলাসের গঠনের সামঞ্জস্য থেকে একথা প্রতীয়মান হয় যে এর মধ্যে পরমাণবিক বা আণবিক মাপের এমন একটা মৌলিক একক থাকে যার পৌনঃপুনিক বিন্যাসের ফলে সমগ্র কেলাসটি গঠিত হয়। এর থেকে মনে হয় যে কেলাসের মধ্যে অণু বা পরমাণুগুলি স্তরে স্তরে সাজান থাকে, এবং এই সমস্ত স্তরগুলির

চিত্র 6·18

ফ্রীদ্‌রিখ ও ক্লিপিং-এর X-রশ্মি ব্যবর্তন পর্যবেক্ষণের পরীক্ষা ব্যবস্থা।

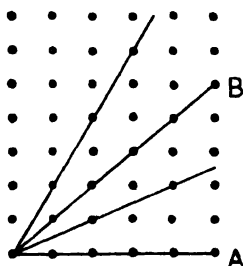
পারস্পরিক ব্যবধান X-রশ্মির তরঙ্গদৈর্ঘ্যের সংগে তুলনীয় হয়। কাজেই কেলাসের গঠন X-রশ্মির ব্যবর্তন উৎপন্ন করার পক্ষে খুবই উপযোগী বলে লাওয়ের মনে হয়।

লাওয়ের নির্দেশে ফ্রীদ্‌রিখ ও ক্লিপিং (Friedrich and Knipping) নামক দুই বিজ্ঞানী তাঁর অনুমানের সত্যতা প্রমাণ করবার জন্য নিম্নে বর্ণিত পরীক্ষা অনুষ্ঠিত করেন। তাঁদের পরীক্ষা প্রণালী (6·18) চিত্রে প্রদর্শিত হয়েছে। একগুচ্ছ সমান্তরিত নিরবচ্ছিন্ন (Continuous) X-রশ্মি একটি পাতলা দস্তা-সালফাইড (ZnS) কেলাসের ভিতর দিয়ে পাঠান হয়। নিঃসৃত রশ্মিগুচ্ছ P ফোটোগ্রাফিক প্লেটের উপর আপতিত হয়। প্লেটটিকে বিকসিত করলে ঠিক কেন্দ্রস্থলে অর্থাৎ আপতিত রশ্মিগুচ্ছ যেখানে প্লেটকে ছেদ করে সেখানে একটি কৃষ্ণ বিন্দু (Spot) দেখা যায়। এছাড়া এই কেন্দ্রীয় বিন্দুর

চিত্র 6·19

লাওয়ে বিন্দু

চারিদিকে একটা নির্দিষ্ট নকশার আকারে আরও অনেকগুলি কৃষ্ণ বিন্দু দেখতে পাওয়া যায়। এই বিন্দুগুলিকে 'লাওয়ে বিন্দু' (Laue Spots) বলা হয়। (6·19) চিত্রে LiF কেলাসের দ্বারা সৃষ্ট এইরূপ 'লাওয়ে ব্যবর্তন নকশা' (Laue Diffraction Pattern) দেখান হয়েছে।

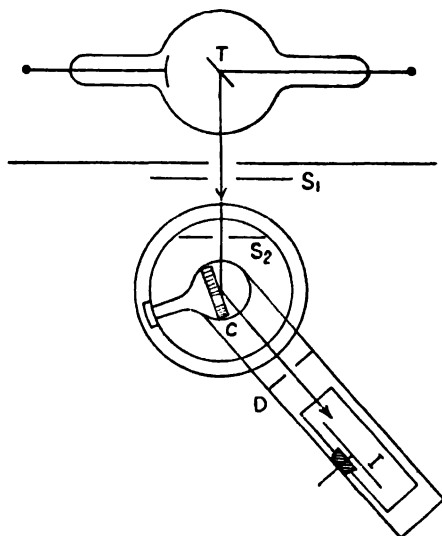
প্রখ্যাত বৃটিশ বিজ্ঞানী ব্র্যাগ (W. L. Bragg) লাওয়ে ব্যবর্তন নকশার উৎপত্তির সহজ ব্যাখ্যা প্রদান করতে সমর্থ হন। তিনি অনুমান করেন যে কেলাসিত পদার্থের মধ্যে বিশেষ কতকগুলি সমান্তরাল সমতল থাকে যাদের উপর কেলাসের পরমাণু বা অণুগুলি খুব ঘন সন্নিবিষ্ট থাকে। একটি তীক্ষ্ণ সূচল দণ্ডের প্রান্ত দিয়ে আঘাত করলে কেলাসটি উপরোক্ত তল বরাবর বিদীর্ণ হয়ে যায়। এই তলগুলিকে বলা হয় 'বিদারণ-তল' (Cleavage Planes)।

এই বিদারণ-তলগুলিতে পরমাণুগুলির ঘন সন্নিবেশের কারণ সহজ ভাবে বোঝাবার জন্য (6·20) চিত্রে ত্রিমাত্রিক (Three Dimensional) কেলাসের বদলে দ্বিমাত্রিক (Two Dimensional) বিন্যাসে সাজান কতকগুলি বিন্দু দেখান হয়েছে। এই বিন্দুগুলি এক একটি পরমাণুর অবস্থান নির্দেশ করে। এই চিত্রে OA, OB প্রভৃতি সরলরেখাগুলির উপর বিন্দুর সংখ্যা অন্যান্য রেখার তুলনায় অনেক বেশী। অর্থাৎ এই রেখাগুলি প্রকৃত

চিত্র 6·20

দ্বিমাত্রিক কেলাসের চিত্ররূপ।

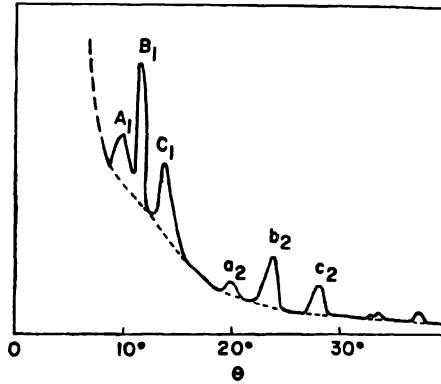
কেলাসের অভ্যন্তরস্থ পরমাণুপূর্ণ বিদারণ-তলের সমতুল্য বলে ধরা যেতে পারে। ব্র্যাগ অনুমান করেন যে আপতিত রশ্মি অন্যান্য তলের তুলনায় কেলাসের বিদারণ-তলগুলি থেকে অধিক পরিমাণে প্রতিফলিত হয়। সেজন্য

প্রতিফলিত রশ্মি কেবল বিশেষ কতকগুলি দিকে দেখতে পাওয়া যায় ; যার ফলে এইসব দিকে একটি করে কৃষ্ণ বিন্দু উৎপন্ন হয়।

ব্র্যাগ তাঁর এই অনুমানের সত্যতা প্রমাণ করবার জন্য একগুচ্ছ সমান্তরিত (Collimated) একবর্ণী X-রশ্মিকে একটি কেলাসের বিদারণ-তলের উপর আপতিত করেন। তিনি লক্ষ্য করেন যে প্রতিফলিত রশ্মি যে দিকে পাবার কথা সেদিকে একটি ফোটোগ্রাফিক প্লেট রাখলে প্লেটের উপর একটি কৃষ্ণ বিন্দু পাওয়া যায়। এরপর তিনি ফোটোগ্রাফিক প্লেটের পরিবর্তে একটি আয়নন কক্ষ (Ionization Chamber) ব্যবহার করেন। আয়নন

চিত্র 6·21

ব্র্যাগ বর্ণালীমাপক যন্ত্র।

কক্ষটি তিনি একটি বর্ণালীমাপক যন্ত্রের বাহুর উপর স্থাপিত করেন এবং কেলাসটিকে উক্ত যন্ত্রের প্রিজ্‌ম্ টেবিলের উপর স্থাপিত করেন (6·21 চিত্র দ্রষ্টব্য)। এই ব্যবস্থার দ্বারা সমান্তরিত আপতিত X-রশ্মিগুচ্ছের সাপেক্ষে আয়নন-কক্ষ (I) এবং কেলাস (C) এই দুটিকেই ইচ্ছামত যে কোন কোণে বিন্যস্ত করে রাখা সম্ভব। এখানে উল্লেখযোগ্য যে লক্ষ্যবস্তু T থেকে নিঃসৃত X-রশ্মিকে প্রথমে $S_1$, $S_2$ দুটি রেখাছিদ্রের সাহায্যে সমান্তরিত করা হয়।

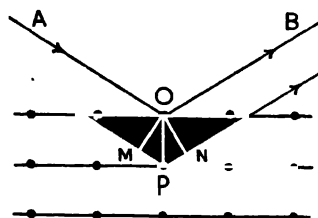
কেলাস C থেকে প্রতিফলিত রশ্মি D রেখাছিদ্রের মধ্য দিয়ে নির্গত হয়ে আয়নন কক্ষে প্রবেশ করে। এখন যদি প্রিজ্‌ম্ টেবিলটিকে ঘুরিয়ে আপতন কোণ নির্দিষ্ট পরিমাণে পরিবর্তিত করা যায়, তাহলে বর্ণালীমাপক যন্ত্রের বাহুটিকে দ্বিগুণ পরিমাণে ঘোরালে প্রতিফলিত রশ্মি আবার আয়নন কক্ষে প্রবেশ করতে পারে। আয়নন কক্ষে উৎপন্ন আয়নন প্রবাহের মান থেকে প্রতিফলিত X-রশ্মির তীব্রতার পরিমাণ পাওয়া সম্ভব। ব্র্যাগ তাঁর পরীক্ষায় বিভিন্ন আপতন কোণের জন্য প্রতিফলিত রশ্মি দ্বারা উৎপন্ন আয়নন প্রবাহ

চিত্র 6·22

ব্র্যাগ বর্ণালীমাপক যন্ত্রের সাহায্যে প্রাপ্ত আয়নন প্রবাহ পরিবর্তনের লেখচিত্র।

পরিমাপ করেন এবং আয়নন প্রবাহ ও আপতন কোণের একটি লেখচিত্র অংকন করেন। (6·22) চিত্রে এইরূপ একটি লেখচিত্র দেখান হয়েছে।

লেখচিত্র থেকে দেখা যায় যে কতকগুলি নির্দিষ্ট আপতন কোণে প্রতিফলিত রশ্মির তীব্রতা সহসা খুব বৃদ্ধি পায়। এই তীব্রতা চূড়াগুলির উৎপত্তি নিম্নলিখিত উপায়ে ব্যাখ্যা করা যায়। (6·23) চিত্রে ঘন সন্নিবিষ্ট পরমাণু সম্পন্ন কেলাস তলগুলির ছেদ (Section) কয়েকটি সরলরেখা দ্বারা নির্দেশিত হয়েছে এবং এই রেখাগুলির উপর পরমাণু বিন্যাস কতকগুলি বিন্দুর দ্বারা নির্দেশ করা হয়েছে। মনে করা যাক যে সংকীর্ণ একগুচ্ছ X-রশ্মি বিদারণ-তলগুলির উপর আপতিত হয়। এক্ষেত্রে সাধারণতঃ আপতন কোণ বা প্রতিফলন কোণ মাপা হয় বিদারণ-তলের সাপেক্ষে। এইভাবে পরিমিত কোণগুলিকে বলা হয় 'তির্যক-কোণ'

(Glancing Angle)। এই তির্যক-কোণগুলিকে (6·24) চিত্রে নির্দেশ করা হয়েছে। হাইঘেন্‌স্ (Huyghens) উদ্ভাবিত তরঙ্গ তত্ত্ব অনুসারে আপতিত বিকিরণের প্রভাবে আপতন তলের প্রতিটি পরমাণু গৌণ উৎস (Secondary Source) হিসাবে কাজ করে। যদিও গৌণ উৎসগুলি বিভিন্ন দিকে আলোক তরঙ্গ নিঃসৃত করে, তথাপি যে দিকে প্রতিফলিত রশ্মি এবং আপতন তলের অন্তর্গত কোণ, আপতিত রশ্মি এবং আপতন তলের অন্তর্গত কোণের সমান হয় কেবল সেই দিকেই প্রতিফলিত রশ্মির তীব্রতা যথেষ্ট হয়। এইভাবে তরঙ্গ তত্ত্বের সাহায্যে প্রতিফলনের সূত্র ( আপতন কোণ = প্রতিফলন কোণ ) ব্যাখ্যা করা হয়। সাধারণ আলোক কেবল প্রতিফলকের উপরিতল থেকে প্রতিফলিত হয়। X-রশ্মি কিন্তু কেলাসের অভ্যন্তরে কিছুদূর পর্যন্ত অনুপ্রবেশ করে। ফলে আপতিত রশ্মি বিভিন্ন সমান্তরাল তল থেকে প্রতিফলিত হতে পারে।

(6·23) চিত্রে $d$ ব্যবধানে অবস্থিত পরপর দুটি কেলাস তল থেকে X-রশ্মির প্রতিফলন দেখান হয়েছে। দুটি তলের উপর $\theta$ তির্যক-কোণে আপতিত দুটি রশ্মি AO এবং CP যথাক্রমে O এবং P বিন্দুতে আপতিত হয়। OB এবং PD হচ্ছে তলদুটি থেকে প্রতিফলিত দুটি সমান্তরাল

চিত্র 6·23

ব্র্যাগ প্রতিফলন ( দ্বিমাত্রিক ) চিত্র।

রশ্মি। OM এবং ON হচ্ছে যথাক্রমে O বিন্দু থেকে আপতিত এবং প্রতিফলিত রশ্মি দুটির উপরে অংকিত দুটি লম্ব। (6·23) চিত্র থেকে প্রতীয়মান হয় যে দ্বিতীয় স্তর থেকে প্রতিফলিত রশ্মি প্রথম স্তর থেকে প্রতিফলিত রশ্মি অপেক্ষা (MP + PN) পরিমাণ বেশী পথ অতিক্রম করে। যদি এই পথ-ব্যবধান একটি পূর্ণ তরঙ্গদৈর্ঘ্য $\lambda$ বা এর পূর্ণ গুণিতক হয়, তাহলে প্রতিফলনের পর দুটি রশ্মির মধ্যে গঠনমূলক ব্যতিচার (Constructive

Interference) ঘটবে। অর্থাৎ প্রতিফলিত রশ্মির তীব্রতা উচ্চতম হবার শর্ত হচ্ছে

$$MP + PN = n\lambda$$

এখানে $n$ একটি পূর্ণসংখ্যা।

চিত্র থেকে সহজেই বোঝা যায় যে $MP = PN = d \sin \theta$ হয়। অতএব নির্দিষ্ট কোণে প্রতিফলিত রশ্মি তীব্রতম হবার শর্ত হচ্ছে

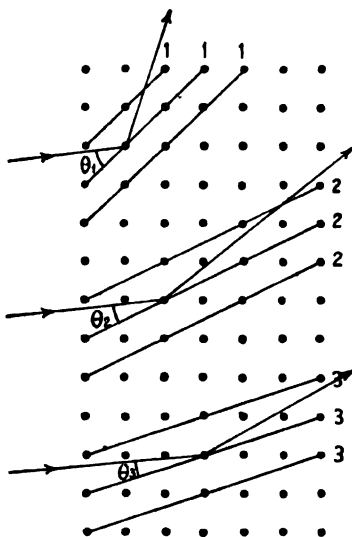
$$2d \sin \theta = n\lambda \tag{6·28}$$

(6·28) সমীকরণকে বলা হয় 'ব্র্যাগ সমীকরণ' (Bragg Equation)। এখানে উল্লেখযোগ্য যে যদিও উপরে আলোচিত সংঘটনকে প্রতিফলন বলে অভিহিত করা হয়েছে, প্রকৃতপক্ষে এক্ষেত্রে কেলাসের বিভিন্ন স্তর থেকে ব্যবর্তন (Diffraction) সংঘটিত হয়।

সমীকরণ (6·28) থেকে দেখা যায় যে যখন $n=1$ হয়, তখন প্রথম ক্রমের (First Order) প্রতিফলন পাওয়া যায়। এক্ষেত্রে লেখা যায় $2d \sin \theta_1 = \lambda$ ; অর্থাৎ এক্ষেত্রে কেলাস তলের সংগে $\theta_1$ তির্যক কোণে প্রতিফলিত রশ্মির তীব্রতা উচ্চতম হয়। আবার যখন $n=2$ হয়, তখন দ্বিতীয় ক্রমের (Second Order) প্রতিফলন সংঘটিত হয়। এক্ষেত্রে আমরা পাই $2d \sin \theta_2 = 2\lambda$ ; অর্থাৎ $\theta_2$ তির্যক কোণে আবার তীব্র প্রতিফলন পাওয়া যায়। (6·22) চিত্রে এইরূপ বিভিন্ন ক্রমের প্রতিফলনের জন্য প্রাপ্ত আয়নন প্রবাহ চূড়াগুলি দেখান হয়েছে। উক্ত চিত্রে প্রথম ক্রমে পরপর তিনটি প্রবাহ চূড়া ($A_1$, $B_1$ এবং $C_1$) দেখা যায়। এগুলি তিনটি বিভিন্ন তরঙ্গদৈর্ঘ্যের বিকিরণ দ্বারা উৎপন্ন চূড়া। দ্বিতীয় ক্রমেও এইরকম তিনটি চূড়া দেখা যায় ($a_2$, $b_2$ এবং $c_2$)। দ্বিতীয় ক্রমের চূড়াগুলির আপেক্ষিক উচ্চতা প্রথম ক্রমের চূড়াগুলির আপেক্ষিক উচ্চতার অনুরূপ। (6·22) লেখচিত্র প্রকৃতপক্ষে লক্ষ্যবস্তু থেকে নিঃসৃত X-রশ্মির বর্ণালী নির্দেশ করে। নির্দিষ্ট তরঙ্গদৈর্ঘ্য সম্পন্ন বিকিরণের জন্য যদি $\theta_1$, $\theta_2$ এবং $\theta_3$ যথাক্রমে প্রথম, দ্বিতীয় এবং তৃতীয় ক্রমে প্রাপ্ত চূড়াগুলির ক্ষেত্রে আপতন কোণের মান হয়, তাহলে সমীকরণ (6·28) থেকে পাওয়া যায়

$$\sin \theta_1 : \sin \theta_2 : \sin \theta_3 = 1 : 2 : 3$$

উদাহরণস্বরূপ, কোন এক পরীক্ষায় খনিজ লবণ (NaCl) কেলাস

দ্বারা ব্যবর্তিত রোডিয়াম X-রশ্মির জন্য $\theta_1$, $\theta_2$ এবং $\theta_3$ কোণগুলির নিম্নলিখিত মান পাওয়া যায় :

চিত্র 6·24

বিভিন্ন কেলাস তলগুচ্ছ থেকে X-রশ্মির প্রতিফলন ( দ্বিমাত্রিক ছেদ ) ।

$$\theta_1 = 11{\cdot}8^\circ \qquad \theta_2 = 23{\cdot}5^\circ \qquad \theta_3 = 36^\circ$$

সুতরাং $\sin\theta_1 : \sin\theta_2 : \sin\theta_3 = 0{\cdot}204 : 0{\cdot}40 : 0{\cdot}63$

$= 1 : 2 : 3$ ( প্রায় )

(6·28) সমীকরণের সাহায্যে X-রশ্মির তরঙ্গদৈর্ঘ্য পরিমাপ করা যায়, যদি কেলাস তলগুলির পারস্পরিক ব্যবধান $d$ জানা থাকে। অপরপক্ষে যদি তরঙ্গদৈর্ঘ্য $\lambda$ জানা থাকে, উক্ত সমীকরণের সাহায্যে $d$ পরিমাপ করা যায়।

উপরের আলোচনা থেকে লাওয়ে ব্যবর্তন নকশার উৎপত্তির কারণ বোঝা সম্ভব। (6·24) চিত্রে একটি কেলাসের অভ্যন্তরে অবস্থিত সমান্তরাল কেলাস তলগুলিকে এক গুচ্ছ সমান্তরাল সরলরেখা দ্বারা নির্দেশ করা হয়েছে। এই রকম কয়েকটি বিভিন্ন সমান্তরাল রেখাগুচ্ছ উক্ত চিত্রে দেখান হয়েছে।

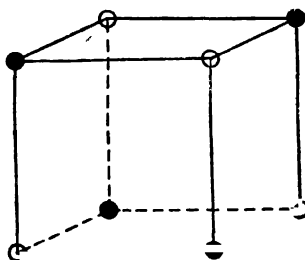
(1, 2, 3) প্রভৃতি বিভিন্ন কেলাস তলগুচ্ছের উপর $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ প্রভৃতি বিভিন্ন তির্যক কোণে X-রশ্মি আপতিত হয়। বিভিন্ন কেলাস তলগুচ্ছের পারস্পরিক ব্যবধান $d_1, d_2, d_3$ প্রভৃতি পৃথক হয়। অবশ্য এই ব্যবধান-গুলির পরস্পরের মধ্যে নির্দিষ্ট সম্পর্ক আছে। এই সম্পর্ক নির্ভর করে কেলাসের গঠনের উপর। যে কোন কেলাস তলগুচ্ছ থেকে প্রতিফলিত রশ্মিগুলির মধ্যে গঠনমূলক ব্যতিচার ঘটে যদি তাদের তরঙ্গদৈর্ঘ্য ব্র্যাগ সমীকরণ (6·28) দ্বারা নির্ধারিত হয়। অর্থাৎ যদি আপতিত রশ্মির মধ্যে উক্ত নির্দিষ্ট তরঙ্গদৈর্ঘ্য সম্পন্ন রশ্মি বর্তমান থাকে তবেই এই বিশেষ তলগুলি থেকে প্রতিফলিত রশ্মির তীব্রতা যথেষ্ট হয় এবং প্রতিফলিত রশ্মির অভিমুখে একটি লাওয়ে বিন্দু পাওয়া যায়। (6·24) চিত্র থেকে আরও দেখা যায় যে কেলাসের মধ্যে যথেষ্ট ঘন সন্নিবিষ্ট পরমাণু সম্পন্ন তলগুচ্ছের সংখ্যা খুব বেশী নয়। কাজেই আপতিত রশ্মির মধ্যে বিস্তৃত পাল্লার তরঙ্গদৈর্ঘ্য সম্পন্ন বিকিরণ থাকলেও লাওয়ে বিন্দুর সংখ্যা খুব বেশী হয় না। যেহেতু লাওয়ে বিন্দুগুলির অবস্থান নির্ভর করে কেলাস তলগুলির পারস্পরিক ব্যবধানের উপর, লাওয়ে নকশা থেকে কেলাসের গঠন নির্ণয় করা সম্ভব। অবশ্য এই পদ্ধতিতে কেলাসের গঠন নির্ণয় করা বেশ কঠিন। ব্র্যাগ কর্তৃক উদ্ভাবিত পদ্ধতিতে উৎপন্ন ব্যবর্তন নকশা অপেক্ষাকৃত অনেক সরল। এর কারণ এক্ষেত্রে একবর্ণী X-রশ্মি ব্যবহার করা হয় এবং আপতিত রশ্মি কেলাসের মধ্যেকার বিশেষ একগুচ্ছ সমান্তরাল কেলাস তল থেকে প্রতিফলিত হয়। সুতরাং এক সংগে মাত্র একটি ক্রমের (Order) বর্ণালী পাওয়া যায়। অপরপক্ষে লাওয়ে পদ্ধতিতে আপতিত রশ্মি হিসাবে শ্বেত বিকিরণ (White Radiation) ব্যবহার করা হয়। এর মধ্যে বর্তমান নির্দিষ্ট তরঙ্গদৈর্ঘ্য সম্পন্ন বিকিরণ বিভিন্ন সমান্তরাল কেলাস তলগুচ্ছ থেকে প্রতিফলিত হয়ে বিভিন্ন ক্রমের (Order) বর্ণালী সৃষ্টি করে। সেইজন্য লাওয়ে পদ্ধতিতে উৎপন্ন ব্যবর্তন নকশা অনেক বেশী জটিল। ব্র্যাগ পদ্ধতি X-রশ্মির তরঙ্গদৈর্ঘ্য নিরূপণের পক্ষে খুবই সুবিধাজনক।

উপরে আলোচিত পদ্ধতিতে ব্র্যাগ সমীকরণ নির্ণয় করার সময় কেবল পরপর দুটি স্তর থেকে প্রতিফলন বিবেচনা করা হয়। অর্থাৎ এই পদ্ধতি সাধারণ দ্বিমাত্রিক ঝাঁঝরি কর্তৃক উৎপন্ন ব্যবর্তনের সমীকরণ নির্ণয় করার সমতুল্য। লাওয়ে নকশা ব্যাখ্যা করবার জন্য ফন্ লাওয়ে নিজে একটি গাণিতিক তত্ত্ব উদ্ভাবিত করেন। এই তত্ত্ব থেকে ব্র্যাগ সমীকরণ (6·28)

পাওয়া যায়। অবশ্য এই তত্ত্ব উপরে আলোচিত সরল তত্ত্ব অপেক্ষা অনেক বেশী জটিল।

এই তত্ত্বে কেলাস মধ্যস্থ যে কোন দুটি পরমাণু থেকে ব্যবর্তন বিবেচনা করা হয়। অর্থাৎ কেলাস যে প্রকৃতপক্ষে একটি ত্রিমাত্রিক ব্যবর্তন ঝাঁঝরির মত কাজ করে তা বিবেচনা করে এই তত্ত্ব উদ্ভাবিত করা হয়।

### 6·13 : কেলাসে উৎপন্ন ব্যবর্তন থেকে X-রশ্মির তরঙ্গদৈর্ঘ্য নিরূপণ

(6·12) অনুচ্ছেদে উল্লেখ করা হয়েছে যে কেলাস তলগুলির পারস্পরিক ব্যবধান $d$ জানা থাকলে ব্র্যাগ সমীকরণের সাহায্যে X-রশ্মির তরঙ্গদৈর্ঘ্য নিরূপণ করা সম্ভব। কেলাসের 'ঝাঁঝরি-ব্যবধান' (Grating Space) নির্ণয় করতে হলে অবশ্য ব্যবহৃত কেলাসের গঠন জানা প্রয়োজন। খনিজ লবণ (NaCl) কেলাসের গঠন খুব সঠিকভাবে নির্ণয় করা হয়েছে। এর জ্যামিতিক গঠন একটি সরল ঘনক (Simple Cube) সদৃশ। ঘনকের আট কোণে সোডিয়াম এবং ক্লোরিন পরমাণুগুলি পর্যায়ক্রমে সাজান থাকে

চিত্র 6·25

সাধারণ লবণের (NaCl) ঘনকাকৃতি কেলাসের চিত্ররূপ। ঘনকের বিভিন্ন কৌণিক বিন্দুতে $Na^+$ এবং $Cl^-$ আয়ন অবস্থিত থাকে।

(6·25 চিত্র দ্রষ্টব্য)। এই রকম বহু সংখ্যক ঘনকের পরস্পর সংলগ্ন পৌনঃপুনিক ত্রিমাত্রিক বিন্যাসের ফলে সমগ্র কেলাসটি গঠিত হয়। যে কোন দুটি সংলগ্ন ঘনকের সাধারণ সীমাতলের চার কোণে যে চারটি পরমাণু

থাকে সেগুলি দুটি ঘনকের মধ্যেই বণ্টিত থাকে বলে মনে করা যায়। কেলাসের মধ্যে পরমাণুগুলির এইরূপ নিয়মানুযায়ী বিন্যাস যেন একটি জাফরির (Lattice) মধ্যেকার নকশার বিন্যাসের মত। সেইজন্য এইরূপ গঠনকে 'জাফরি-গঠন' (Lattice Structure) বলা যায়। কেলাসের ভিতরের পরমাণু সন্নিবিষ্ট তলগুলির, অর্থাৎ ঘনক তলগুলির মধ্যেকার দূরত্ব নিম্নলিখিত উপায়ে নির্ণয় করা যায়।

ঘনকাকৃতি কেলাসের প্রত্যেক পরমাণু আটটি ঘনকের সংযোগস্থলে অবস্থিত থাকে। যেহেতু প্রতি ঘনকের আট কোণে আটটি পরমাণু থাকে এবং বিপুল সংখ্যক এইরূপ ঘনক পরস্পর সংলগ্ন হয়ে ত্রিমাত্রিক কেলাস গঠিত করে, কাজেই মনে করা যেতে পারে যে গড়ে প্রত্যেক ঘনকের অংশে একটি করে পরমাণু বণ্টিত হয়। অর্থাৎ কেলাসের মধ্যে যতগুলি পরমাণু থাকে ঠিক ততগুলি ঘনকও থাকে। মনে করা যাক যে কেলাসটির একক আয়তনে $n$ সংখ্যক NaCl অণু আছে; অর্থাৎ মোট $2n$ সংখ্যক পরমাণু আছে। যদি NaCl এর আণবিক ভার হয় $M$ এবং এর ঘনত্ব হয় $\rho$, তাহলে লেখা যায়

$$n = \frac{N}{M}\rho$$

এখানে $N$ হচ্ছে অ্যাভোগেড্রো সংখ্যা (Avogadro Number)। উপরের আলোচনা থেকে বোঝা যায় যে প্রতি একক আয়তনে বর্তমান ঘনকের সংখ্যাও $2n$ হয়, অর্থাৎ প্রত্যেক ঘনকের আয়তন হচ্ছে

$$v = \frac{1}{2n} = \frac{M}{2N\rho}$$

যদি কেলাস তলগুলির পারস্পরিক দূরত্ব হয় $d$, তাহলে ঘনকগুলির বাহুর দৈর্ঘ্যও $d$ হবে। কাজেই আমরা পাই

$$d = \sqrt[3]{v} = \sqrt[3]{\frac{M}{2N\rho}} \tag{6·29}$$

সমীকরণ (6·29) থেকে বিভিন্ন সংখ্যার মান বসিয়ে $d$ নির্ণয় করা যায়। খনিজ লবণ কেলাসের ক্ষেত্রে $M = 58{\cdot}45$ এবং $\rho = 2{\cdot}164$ গ্রাম/ঘন সেমি; অতএব আমরা পাই

$$d = \sqrt[3]{\frac{58{\cdot}45}{2 \times 6{\cdot}025 \times 10^{23} \times 2{\cdot}164}} = 2{\cdot}814 \times 10^{-8} \text{ সেমি}$$

পরবর্তী যুগে বিভিন্ন পদ্ধতিতে ( যেমন রেখাংকিত ঝাঁঝরির সাহায্যে ) X-রশ্মির তরঙ্গদৈর্ঘ্য খুব সঠিকভাবে মাপা হয়। এইভাবে পরিমিত তরঙ্গদৈর্ঘ্যের মান থেকে ব্র্যাগ সমীকরণের সাহায্যেও $d$ পাওয়া যায়। বিখ্যাত সুইডিশ বিজ্ঞানী সীগ্‌বান (Siegbahn) এবং তাঁর সহকর্মীবৃন্দ এইরূপ অনেক পরীক্ষার পর $18^\circ$ সে উষ্ণতায় খনিজ লবণের ঝাঁঝরি-ব্যবধানের যে মান নির্ণয় করেন তা হচ্ছে

$$d = 2{\cdot}81400 \times 10^{-8} \text{ সেমি}$$

কেলাস ব্যবর্তন পদ্ধতিতে X-রশ্মির তরঙ্গদৈর্ঘ্যের সমস্ত পরিমাপই বর্তমানে খনিজ লবণ কেলাসের ঝাঁঝরি-ব্যবধানের উপরোক্ত মানের ভিত্তিতে করা হয়।

সব সময় অবশ্য খনিজ লবণ কেলাস ব্যবহার করা সম্ভব হয় না। কারণ এই কেলাস জলাকর্ষী (Hygroscopic) হয়। সেইজন্য একই তরঙ্গদৈর্ঘ্য সম্পন্ন X-রশ্মি ব্যবহার করে অন্য কোন কেলাসের ( যথা ক্যালসাইটের ) ঝাঁঝরি ব্যবধান ($d'$) নির্ণয় করা হয়। ব্র্যাগ সমীকরণ থেকে পাওয়া যায়

$$2d \sin\theta = n\lambda = 2d' \sin\theta'$$

অর্থাৎ
$$d' = d\,\frac{\sin\theta}{\sin\theta'}$$

NaCl কেলাসের জন্য $d$ জানা থাকলে অন্য কেলাসটির জন্য $d'$ নিরূপণ করা যায়। ক্যালসাইটের ক্ষেত্রে $18^\circ$ সে উষ্ণতায় এইভাবে নিরূপিত ঝাঁঝরি-ব্যবধান পাওয়া যায়

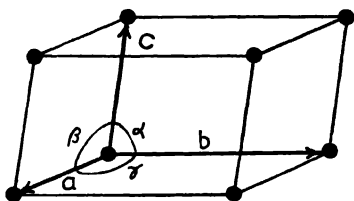
$$d' = 3{\cdot}02945 \times 10^{-8} \text{ সেমি}$$

X-রশ্মির তরঙ্গদৈর্ঘ্য নির্ণয়ের জন্য ক্যালসাইট কেলাস অনেক ক্ষেত্রে ব্যবহার করা হয়।

এখানে উল্লেখযোগ্য যে অতি ক্ষুদ্র তরঙ্গদৈর্ঘ্য সম্পন্ন X-রশ্মি বা পরমাণু কেন্দ্রক নিঃসৃত $\gamma$-রশ্মির ক্ষেত্রে ব্র্যাগ প্রতিফলন কোণের মান খুব ছোট হয়। ফলে সঠিক ভাবে $\lambda$ পরিমাপ করা বেশ শক্ত। সেইজন্য বর্তমানে অতি ক্ষুদ্র তরঙ্গদৈর্ঘ্য পরিমাপের জন্য ডুমণ্ড (Dumond) এবং কোশোয়া (Mlle Cauchois) কর্তৃক উদ্ভাবিত বক্র-কেলাস (Curved Crystal) পদ্ধতি ব্যবহার করা হয়। এই পদ্ধতিতে 2 মিমি বেধ সম্পন্ন এবং 50 মিমি প্রশস্ত একটি স্ফটিক (Quartz) কেলাসকে ইস্পাত নির্মিত দুটি

বক্র প্লেটের অন্তর্বর্তী স্থানে স্থাপিত করে অল্প পরিমাণে বক্র করা হয়। কেলাস তলগুলি বক্র হয়ে যাওয়ার জন্য প্রতিফলিত রশ্মিগুলি একটি নির্দিষ্ট ফোকাস বিন্দু থেকে নিঃসৃত হয়ে আসে বলে মনে হয়। এই পদ্ধতিতে খুব সূক্ষ্ম পরিমাপ সম্ভব।

## 6·14 : কেলাসের গঠন ; মিলার সূচক

যে কোন কেলাসের বহিরাকৃতি লক্ষ্য করলে একটা নির্দিষ্ট সামঞ্জস্য দেখতে পাওয়া যায়। এর থেকে অনুমান করা যায় যে কেলাসের মধ্যে অণু বা পরমাণুগুলি একটা নির্দিষ্ট নিয়মিত নকশা অনুযায়ী বিন্যস্ত থাকে। এক বা একাধিক পরমাণু দ্বারা গঠিত এইরূপ একটি মৌলিক ত্রিমাত্রিক নকশার পৌনঃপুনিক ত্রিমাত্রিক বিন্যাসের ফলে সমগ্র কেলাসটি গঠিত হয়। এই মৌলিক নকশাকে কেলাসের 'একক-কোষ' (Unit Cell) বলা হয়। কেলাসের বহিরাকৃতি উপরোক্ত একক-কোষের আকৃতির সমতুল্য বলে অনুমান করা হয়। পূর্ব অনুচ্ছেদে দেখা গেছে যে NaCl কেলাসের ক্ষেত্রে উক্ত একক-কোষ ঘনকের আকৃতি বিশিষ্ট হয়। যে কোন একক-কোষের আকৃতি এর বাহুগুলির দৈর্ঘ্যের ($a$, $b$, $c$) এবং বাহুগুলির অন্তর্গত তিনটি কোণের দ্বারা নির্ধারিত হয়। বাহুগুলি অবশ্য পরস্পরের অভিলম্বে নাও থাকতে পারে।

চিত্র 6·26

একক-কোষ।

এইরূপ একটি একক-কোষ (6·26) চিত্রে দেখান হয়েছে। কোষের বাহুগুলি কেলাসের তিনটি অক্ষ নির্দেশ করে। কোষের কৌণিক বিন্দুগুলিকে 'জাফরি-বিন্দু' (Lattice Points) বলা হয়। ঘনকাকৃতি (Cubical) বা অনুরূপ সরল কেলাসের ক্ষেত্রে প্রত্যেক জাফরি বিন্দুতে একটি করে পরমাণু বা পরমাণুগুচ্ছ অবস্থিত থাকে। ইতিপূর্বে কেলাসের মধ্যে ঘন সন্নিবিষ্ট পরমাণু ( বা অণু ) সম্পন্ন কেলাস তলের কথা উল্লেখ করা

হয়েছে। কেলাসের অক্ষ তিনটির সাপেক্ষে এইরূপ একগুচ্ছ সমান্তরাল কেলাস তলের বিন্যাস নির্দেশ করা হয় তিনটি সংখ্যার দ্বারা। এই সংখ্যাগুলিকে বলা হয় 'মিলার-সূচক' (Miller Indices)।

'মিলার-সূচক' বলতে কি বোঝায় তা সহজ ভাবে ব্যাখ্যা করবার জন্য প্রকৃত ত্রিমাত্রিক কেলাসের পরিবর্তে (6·27) চিত্রে একটি কেলাসের দ্বিমাত্রিক ছেদ

চিত্র 6·27

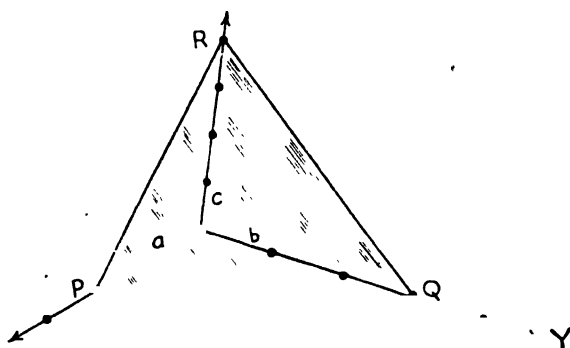
মিলার-সূচক ব্যাখ্যার জন্য প্রদর্শিত একটি কেলাসের দ্বিমাত্রিক ছেদ।

(Section) দেখান হয়েছে। এক্ষেত্রে OACB প্রভৃতি দ্বিমাত্রিক একক-কোষগুলির পৌনঃপুনিক বিন্যাসের ফলে সমগ্র দ্বিমাত্রিক চিত্রটি গঠিত হয়। প্রকৃত কেলাসের কেলাস তলগুলির পরিবর্তে এই চিত্রে KL, PQ প্রভৃতি ঘন সন্নিবিষ্ট জাফরি-বিন্দু সম্বলিত কতকগুলি 'কেলাস রেখা' অংকিত করা হয়েছে। মনে করা যাক যে $a$ ও $b$ হচ্ছে যথাক্রমে OX এবং OY কেলাস অক্ষ দুটির অভিমুখে একক-কোষের বাহুগুলির দৈর্ঘ্য। (6·27) চিত্র থেকে দেখা যায় যে X এবং Y-অক্ষের উপরে এই কেলাস রেখাগুলির অন্তর্দৈর্ঘ্য (Intercepts) একক-কোষের বাহুগুলির পূর্ণ গুণিতক হয়। উদাহরণস্বরূপ KL রেখাটির X ও Y অন্তর্দৈর্ঘ্য যথাক্রমে $OK=3a$ এবং $OL=2b$ হয়। স্পষ্টতঃ $a$ এবং $b$-এর এককে প্রকাশ করলে এই অন্তর্দৈর্ঘ্য দুটির দৈর্ঘ্য যথাক্রমে 3 ও 2 একক হয়। এদের বিপরীত সংখ্যাগুলির (Reciprocals) অনুপাত $\frac{1}{3}:\frac{1}{2}$ হয়। সংখ্যা দুটির ল-সা-গু দ্বারা গুণ করলে এই অনুপাতের মান 2 : 3 হয়। এই সংখ্যা দুটিকে KL রেখার মিলার-সূচক বলা হয়। অর্থাৎ KL রেখার মিলার-সূচক (2, 3) লেখা যায়।

এখন আমরা প্রকৃত কেলাসের ক্ষেত্রে মিলার-সূচকের সাধারণ সংজ্ঞা দিতে পারি। যদি কোন ত্রিমাত্রিক কেলাসের একক কোষের তিনটি অক্ষ অভিমুখে বাহুগুলির দৈর্ঘ্য হয় $a$, $b$ এবং $c$, তাহলে উক্ত অক্ষগুলির উপরে যে কোন কেলাস তলের অন্তর্দৈর্ঘ্যগুলির মান হবে $a$, $b$ এবং $c$ সংখ্যা তিনটির পূর্ণ গুণিতক। অর্থাৎ উক্ত অন্তর্দৈর্ঘ্যগুলিকে যথাক্রমে $Ha$, $Kb$ এবং $Lc$ লেখা যায়, যেখানে $H$, $K$ এবং $L$ হচ্ছে তিনটি পূর্ণসংখ্যা। সুতরাং $a$, $b$ এবং $c$ সংখ্যাগুলির এককে প্রকাশ করলে, অন্তর্দৈর্ঘ্যগুলির অনুপাত $H:K:L$ হয়। এই সংখ্যাগুলির ল-সা-গু দ্বারা ভাগ করলে পাওয়া যায়

$$H:K:L=\frac{1}{h}:\frac{1}{k}:\frac{1}{l}$$

স্পষ্টতঃ $h$, $k$ এবং $l$ তিনটি পূর্ণসংখ্যা হবে।

এই তিনটি পূর্ণসংখ্যাকে বলা হয় কেলাস তলটির 'মিলার-সূচক'

চিত্র 6·28

মিলার-সূচক দ্বারা কেলাস তল নির্দেশের নিদর্শন। PQR কেলাস তলের মিলার-সূচক হচ্ছে (6, 4, 3)।

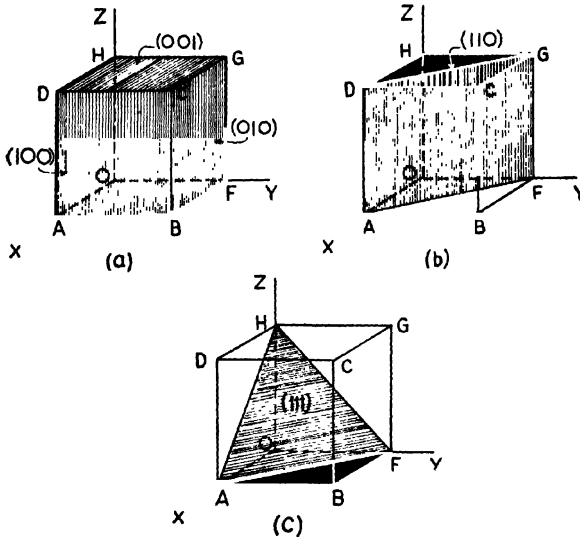
(Miller Indices)। উদাহরণস্বরূপ (6·28) চিত্রে প্রদর্শিত PQR কেলাস তলের অন্তর্দৈর্ঘ্য তিনটি যথাক্রমে $2a$, $3b$ এবং $4c$ হয়।

এখানে $H=2$, $K=3$ এবং $L=4$ হয়। অতএব লেখা যায়

$$H:K:L=2:3:4=\frac{2}{12}:\frac{3}{12}:\frac{4}{12}=\frac{1}{6}:\frac{1}{4}:\frac{1}{3}$$

সুতরাং এখানে মিলার-সূচক (6, 4, 3) হয়।

মিলার-সূচক ধনাত্মক বা ঋণাত্মক হতে পারে। শেষোক্ত ক্ষেত্রে ঋণাত্মক চিহ্নটি সূচক-সংখ্যার উপরে মাত্রা দিয়ে দেখান হয় ( যথা $\bar{2}$ )।

এখন সরলতম অর্থাৎ ঘনকাকৃতি কেলাসের কথা বিবেচনা করা

চিত্র 6·29

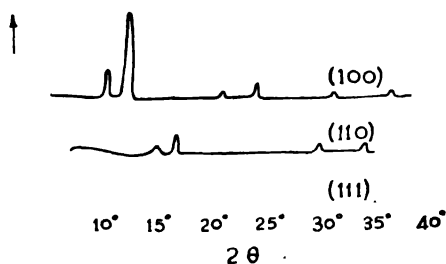
ঘনকাকৃতি কেলাসের বিভিন্ন কেলাস তলের চিত্ররূপ।

যাক। (6·29*a*) চিত্রে এইরূপ কেলাসের একক-কোষ দেখান হয়েছে। এক্ষেত্রে তিনটি কেলাস অক্ষ OX, OY এবং OZ, পরস্পরের সংগে লম্বভাবে বিন্যস্ত থাকে। X-অক্ষের অভিলম্বে অবস্থিত OFGH প্রান্ত তল, Y ও Z অক্ষের সমান্তরাল হয়। সুতরাং এই তল বা এর সমান্তরাল কোন তলের Y এবং Z অন্তর্দৈর্ঘ্যের মান অসীম হয়। অপরপক্ষে X অন্তর্দৈর্ঘ্য সীমিত হয়। যেহেতু অসীমের বিপরীত (Reciprocal) হচ্ছে শূন্য, এই তলগুলির মিলার-সূচক (1, 0, 0) লেখা যায়। অনুরূপে Y এবং Z অক্ষের অভিলম্বে বিন্যস্ত OADH এবং OABF প্রান্ত তলগুলির মিলার-সূচক হচ্ছে যথাক্রমে (0, 1, 0) এবং (0, 0, 1)। আবার (6·29b) চিত্র থেকে দেখা যায় যে AFGD কর্ণ-তলটির (Diagonal Plane) X এবং

Y অন্তর্দৈর্ঘ্যের মান সমান, আর এর Z অন্তর্দৈর্ঘ্যের মান অসীম। সুতরাং এই তলের মিলার-সূচক (1, 1, 0) হয়। অনুরূপভাবে ABGH এবং BDHF কর্ণ-তলদুটির মিলার-সূচক যথাক্রমে (1, 0, 1) এবং (0, 1, 1) হয়। আবার তিনটি প্রান্ততলের কর্ণ তিনটির দ্বারা নির্ধারিত AFH কর্ণ-তলের X, Y এবং Z অন্তর্দৈর্ঘ্যের মান সমান। সুতরাং এই তলটির মিলার-সূচক (1, 1, 1) হয়।

## 6·15 : NaCl এবং KCl কেলাসের গঠন

X-রশ্মির সাহায্যে সর্বপ্রথম এই দুটি কেলাসের গঠন নির্ণয় করা হয়। এই দুটি কেলাসই ঘনকের আকৃতি বিশিষ্ট। (6·30) চিত্রে KCl কেলাসের (1,0,0) তল থেকে প্রতিফলিত রশ্মির জন্য ব্র্যাগ পদ্ধতিতে প্রাপ্ত আয়নন

চিত্র 6·30

KCl কেলাসের বিভিন্ন কেলাস তল থেকে প্রতিফলিত X-রশ্মির দ্বারা ব্র্যাগ বর্ণালীমাপক যন্ত্রে উৎপন্ন আয়নন প্রবাহ এবং তির্যক কোণের লেখচিত্র।

প্রবাহ চূড়াগুলি দেখান হয়েছে। প্যালাডিয়াম ($Z=46$) X-রশ্মি ব্যবহার করে এই পরীক্ষা করা হয়। তিনটি প্রবাহ চূড়ার জন্য পরিমিত তির্যক কোণের (Glancing Angle) মান হচ্ছে $\theta_1=5°23'$, $\theta_2=10°49'$ এবং $\theta_3=16°20'$। অতএব ব্র্যাগ সমীকরণ থেকে পাওয়া যায়

$$\sin\theta_1 : \sin\theta_2 : \sin\theta_3 = 0{\cdot}09382 : 0{\cdot}18767 : 0{\cdot}28123$$
$$= 1 : 2 : 3$$

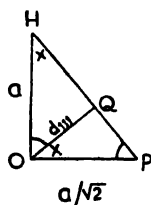
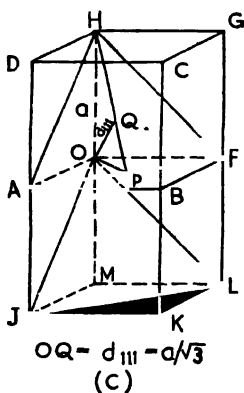
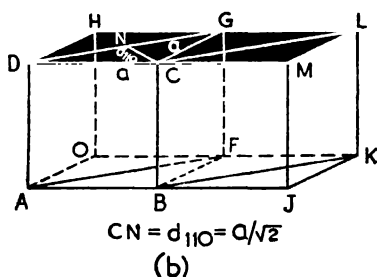
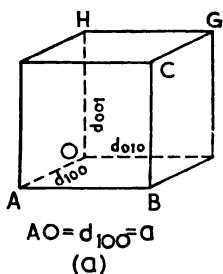
অর্থাৎ এই তিনটি চূড়ার অবস্থান নির্ধারিত হয় ব্র্যাগ সমীকরণ $2d_{100}\sin\theta=n\lambda$ দ্বারা। এখানে $n=1, 2$ এবং 3 ধরতে হবে।

আবার (1,1,0) তল থেকে প্রতিফলনের ক্ষেত্রে প্রথম ক্রমের ($n=1$) তির্যক কোণের মান $\theta=7°37'$ হয়। অনুরূপে (1,1,1) তল থেকে প্রতিফলনের ক্ষেত্রে প্রথম ক্রমের তির্যক কোণের মান $\theta=9°25'$ পাওয়া যায়। সুতরাং ব্র্যাগ সমীকরণ থেকে পাওয়া যায়

$$d_{100} : d_{110}\, d_{111} \quad \frac{1}{\sin\theta_{100}} : \frac{1}{\sin\theta_{110}} : \frac{1}{\sin\theta_{111}}$$

$$= \frac{1}{\sin 5°23'} : \frac{1}{\sin 7°37'} : \frac{1}{\sin 9°25'}$$

$$= 1 : \frac{1}{\sqrt{2}} : \frac{1}{\sqrt{3}} \text{ ( প্রায় )} \qquad (6\cdot30)$$

জ্যামিতিক অংকনের সাহায্যে সহজেই দেখা যায় যে যদি একটি ঘনকাকৃতি

চিত্র 6·31

ঘনকাকৃতি কেলাসের বিভিন্ন কেলাস তলগুচ্ছের ফাফরি ব্যবধান

একক-কোষের বাহুর দৈর্ঘ্য $a$ হয়, তাহলে (6·31$a$) চিত্রে প্রদর্শিত ABCD, OFGH প্রভৃতি (1,0,0) কেলাস তলগুলির পারস্পরিক দূরত্ব $d_{100}=a$ হয়। (6·31$b$) চিত্র থেকে দেখা যায় যে AFGD, BKLC প্রভৃতি (1,1,0) কেলাস তলগুলির পারস্পরিক দূরত্ব $d_{110}=\text{CN}=\text{CD}\sin 45^\circ =a/\sqrt{2}$ হয়। (6·31$c$) চিত্র থেকে AFH, JLO প্রভৃতি (1,1,1) কেলাস তলগুলির পারস্পরিক দূরত্ব $d_{111}=\text{OQ}=\dfrac{a}{\sqrt{3}}$ পাওয়া যায়। §

কাজেই আমরা পাই $d_{100} : d_{110} : d_{111}=1 : \dfrac{1}{\sqrt{2}} : \dfrac{1}{\sqrt{3}}$। অর্থাৎ ব্র্যাগ পদ্ধতিতে নিরূপিত KCl কেলাস তলগুলির ব্যবধানের অনুপাত একটি ঘনকের (1,0,0), (1,1,0) এবং (1,1,1) তলগুলির ব্যবধানের অনুপাতের সমান হয় ( 6·30 সমীকরণ দ্রষ্টব্য )। এর থেকে স্পষ্টই বোঝা যায় যে KCl কেলাসের একক-কোষ হচ্ছে ঘনকের আকৃতি সম্পন্ন। এই ঘনকের বাহুর মানও ব্র্যাগ সমীকরণের সাহায্যে নির্ণয় করা যায়।

এই পরীক্ষা থেকে অবশ্য জাফরি বিন্দুগুলিতে অবস্থিত পরমাণু বা পরমাণুগুচ্ছের স্বরূপ বোঝা যায় না। অর্থাৎ এগুলি প্রত্যেকটি এক একটি KCl অণু অথবা পর্যায়ক্রমে সাজান $K^+$ এবং $Cl^-$ আয়ন, একথা নিশ্চিত ভাবে বলা সম্ভব নয়। এই প্রশ্নের উত্তর পাওয়া যায় NaCl কেলাসের গঠন সম্বন্ধীয় পরীক্ষা থেকে।

NaCl কেলাসের ক্ষেত্রে (1,0,0) তল থেকে প্রতিফলনের জন্য প্রথম ক্রমে ($n=1$) আয়নন প্রবাহ চূড়া পাওয়া যায় $\theta=6^\circ$ কোণে। কাজেই KCl কেলাসের সংগে তুলনা করলে পাওয়া যায়

$$\frac{d_{100}(\text{NaCl})}{d_{100}(\text{KCl})}=\frac{\sin 5^\circ 23'}{\sin 6^\circ}=\frac{0{\cdot}09382}{0{\cdot}10453}=1 : 1{\cdot}114$$

---

§ (6·31$c$) চিত্রের ক্রোড়চিত্র থেকে পাওয়া যায়

$$\text{PH}^2=\text{OH}^2+\text{OP}^2=a^2+\frac{a^2}{2}=\frac{3a^2}{2}$$

$$\text{PH}=\sqrt{\frac{3}{2}}\,a$$

আবার $$\frac{\text{OQ}}{\text{OP}}=\frac{\text{OH}}{\text{PH}}=\frac{a}{a\sqrt{3/2}}=\sqrt{\frac{2}{3}}$$

$$\text{OQ}=d_{111}=\sqrt{\frac{2}{3}}\,\text{OP}=\sqrt{\frac{2}{3}}\,\frac{a}{\sqrt{2}}=\frac{a}{\sqrt{3}}$$

অনুরূপে NaCl এবং KCl কেলাসের (1,1,0) তলগুলি থেকে প্রতিফলিত X-রশ্মির তীব্রতার চূড়ার অবস্থান থেকে পাওয়া যায়

$$\frac{d_{110}(\text{NaCl})}{d_{110}(\text{KCl})} = 1 : 1{\cdot}114$$

কিন্তু এই দুটি কেলাসের (1,1,1) তলের ক্ষেত্রে পাওয়া যায় ঃ

$$\frac{d_{111}(\text{NaCl})}{d_{111}(\text{KCl})} = 2 : 1{\cdot}114$$

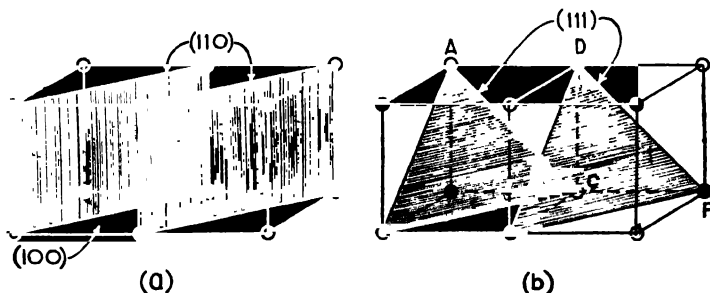
সুতরাং উপরের পরীক্ষালব্ধ ফল থেকে NaCl কেলাসের ক্ষেত্রে পাওয়া যায়

$$d_{100} : d_{110} : d_{111} = 1 : \frac{1}{\sqrt{2}} : \frac{2}{\sqrt{3}} \qquad (6{\cdot}31)$$

সমীকরণ (6·31) থেকে বোঝা যায় যে NaCl কেলাসের (1,1,1) তলগুলির ঝাঁঝরি ব্যবধান $d_{111} = 2a/\sqrt{3}$ হয়। অপরপক্ষে KCl কেলাসের ক্ষেত্রে উক্ত সংখ্যার মান $a/\sqrt{3}$ হয়, একথা আগেই বলা হয়েছে।

এই অপ্রত্যাশিত ফল ব্র্যাগ নিম্নলিখিত ভাবে ব্যাখ্যা করেন। তাঁর মতে KCl বা NaCl কেলাসের জাফরি বিন্দুগুলিতে এদের অণুগুলি অবস্থিত থাকে না, থাকে অণুর অন্তর্গত পরমাণুগুলি আয়নিত অবস্থায় এবং এরা পর্যায়ক্রমে বিন্যস্ত থাকে। এখন বিভিন্ন পরমাণু থেকে বিক্ষিপ্ত X-রশ্মির তীব্রতা বিক্ষেপক পরমাণু মধ্যস্থ ইলেকট্রন সংখ্যার বর্গের প্রায় সমানুপাতিক, একথা জানা আছে। KCl কেলাসের ক্ষেত্রে বিক্ষেপক পরমাণুগুলির পরমাণবিক সংখ্যা ($Z$) যথাক্রমে 19 এবং 17 হয়। যেহেতু বিক্ষেপক পরমাণুগুলি আয়নিত অবস্থায় থাকে ($K^+$ এবং $Cl^-$), সুতরাং এদের দুটির মধ্যেই সমান সংখ্যক, অর্থাৎ 18টি করে ইলেকট্রন থাকে। কাজেই KCl কেলাসের প্রত্যেকটি জাফরি বিন্দু থেকে প্রায় সমান তীব্রতা সম্পন্ন রশ্মি বিক্ষিপ্ত হয়।

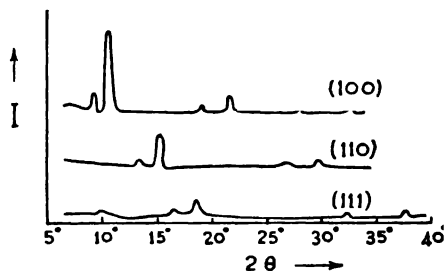
অপরপক্ষে NaCl কেলাসের বিক্ষেপক আয়নগুলি হচ্ছে $Na^+$ এবং $Cl^-$; এই পরমাণুগুলির পরমাণবিক সংখ্যা যথাক্রমে 11 এবং 17 হয়। সুতরাং এই আয়ন দুটিতে যথাক্রমে 10টি এবং 18টি করে ইলেকট্রন থাকে। ফলে $Na^+$ আয়নের তুলনায় $Cl^-$ আয়নগুলির বিক্ষেপ ক্ষমতা অনেক বেশী

হয়। (6·32) চিত্রে বিভিন্ন জাফরি-বিন্দুতে এই দুই প্রকার আয়নের বিন্যাস দেখান হয়েছে। (6·32$a$) চিত্র থেকে দেখা যায় যে প্রত্যেক (1, 0, 0) তলে দুই প্রকার আয়নই সমান সংখ্যায় থাকে। অনুরূপে প্রত্যেক (1, 1, 0) তলেও দুই প্রকার আয়নের সংখ্যা সমান। কিন্তু (1, 1, 1) তলের ক্ষেত্রে

চিত্র 6·32

NaCl কেলাসে বিভিন্ন তলে দুই প্রকার আয়ন ($Na^+$ এবং $Cl^-$) সমাবেশের চিত্র।

অবস্থা অন্য রকম। (6·32$b$) চিত্র থেকে দেখা যায় যে কোন একটি (1, 1, 1) তলে কেবল এক প্রকারের আয়নই থাকে। ঠিক পরবর্তী সমান্তরাল (1, 1, 1) তলে অন্য প্রকারের আয়ন থাকে। এইভাবে দুই প্রকার আয়ন পরপর (1, 1, 1) তলগুলিতে পর্যায়ক্রমে সাজান থাকে। উদাহরণস্বরূপ (6·32$b$) চিত্রে ABC তলে কেবল $Cl^-$ আয়ন থাকে ; পরবর্তী সমান্তরাল DEF তলে কেবল $Na^+$ আয়ন থাকে। যেহেতু $Na^+$ আয়নের বিক্ষেপ ক্ষমতা $Cl^-$ আয়নের তুলনায় অনেক কম, আমরা প্রাথমিকভাবে ধরে নিতে পারি যে $Na^+$ আয়নপূর্ণ (1, 1, 1) তলগুলি থেকে কোন বিক্ষেপ হয় না, কেবল $Cl^-$ আয়নপূর্ণ (1, 1, 1) তলগুলি থেকেই বিক্ষেপ হয়। এই তলগুলির পারস্পরিক দূরত্ব $2a/\sqrt{3}$ হয়। সুতরাং NaCl কেলাসের (1, 1, 1) তল থেকে প্রতিফলনের জন্য প্রত্যাশিত কোণের প্রায় অর্ধমানে প্রথম ক্রমের প্রবাহ চূড়া পাওয়া যায়।

এই আলোচনায় $Na^+$ আয়ন থেকে বিক্ষেপের সম্ভাব্যতা সম্পূর্ণ উপেক্ষা করা হয়েছে। প্রকৃতপক্ষে এই আয়নগুলি থেকেও কিছু পরিমাণ বিক্ষেপ হয়। যেহেতু প্রত্যেক $Na^+$ আয়নপূর্ণ (1, 1, 1) তল পরপর দুটি $Cl^-$

আয়নপূর্ণ (1, 1, 1) তলের ঠিক মাঝামাঝি অবস্থিত থাকে, উক্ত $Na^+$ আয়নপূর্ণ তলগুলি থেকে প্রথম ক্রমের প্রতিফলিত রশ্মি এবং নিকটতম $Cl^-$ আয়নপূর্ণ তল থেকে প্রতিফলিত রশ্মির মধ্যে $\lambda/2$ পরিমাণ পথ-ব্যবধান থাকে। ফলে এদের মধ্যে বিধ্বংসী ব্যতিচার (Destructive Interference) ঘটে। সেজন্য প্রথম ক্রমের তীব্রতা অপেক্ষাকৃত কম হয়।

চিত্র 6·33

NaCl কেলাসের বিভিন্ন কেলাস তল থেকে প্রতিফলিত X-রশ্মির দ্বারা ব্র্যাগ বর্ণালীমাপক যন্ত্রে উৎপন্ন আয়নন প্রবাহ এবং তির্যক কোণের লেখচিত্র।

দ্বিতীয় ক্রমে ($n=2$) অবশ্য $Na^+$ এবং $Cl^-$ আয়নপূর্ণ তলগুলি থেকে প্রতিফলিত রশ্মির মধ্যে গঠনমূলক ব্যতিচার ঘটে। ফলে দ্বিতীয় ক্রমের তীব্রতা অপেক্ষাকৃত বেশী হয় ( 6·33 চিত্র দ্রষ্টব্য )।

KCl এবং NaCl কেলাসের (1, 1, 1) তল থেকে প্রাপ্ত ব্যবর্তন নকশার উপরোক্ত বৈষম্য থেকে বোঝা যায় এই কেলাস দুটির ঘনকাকৃতি একক কোষের জাফরি বিন্দুগুলিতে দুই প্রকার পরমাণবিক আয়ন পর্যায়ক্রমে সাজান থাকে। যদি সম্পূর্ণ অণুগুলি ( অর্থাৎ KCl বা NaCl অণু ) প্রত্যেক জাফরি বিন্দুতে অবস্থিত থাকত তাহলে উপরোক্ত বৈষম্য ঘটবার কোন কারণ থাকত না। দুই প্রকার কেলাসেরই (1, 1, 1) তলসহ সব কেলাস তল থেকে প্রাপ্ত ব্যবর্তন নকশা একই রকম হত।

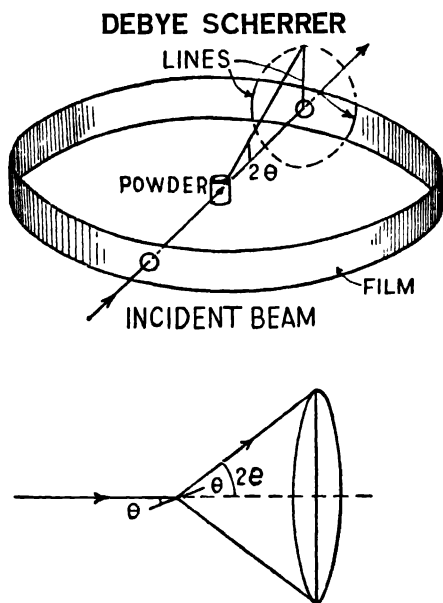
## 6·16 : কেলাস গঠন নির্ণয়ের জন্য বিভিন্ন প্রকার পরীক্ষা পদ্ধতি

**(ক) লাওয়ে পদ্ধতি :** ইতিপূর্বে (6·12) অনুচ্ছেদে কেলাস গঠন নির্ণয়ের জন্য 'লাওয়ে বিন্দু' পদ্ধতি আলোচনা করা হয়েছে। এই পদ্ধতিতে নিরবচ্ছিন্ন বা শ্বেত বিকিরণ ব্যবহার করা হয়। পরীক্ষাধীন কেলাসটি প্রায় 0·5 মিমি দীর্ঘ বাহু সম্পন্ন একক কেলাস (Single Crystal) হওয়া

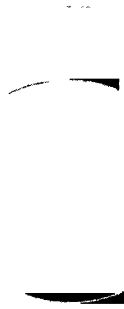
প্রয়োজন। পরীক্ষার দ্বারা প্রাপ্ত লাওয়ে বিন্দুগুলির নকশা সাধারণতঃ খুব জটিল হয়। ফলে কেলাসের গঠন নির্ণয়ের কাজ বেশ কঠিন হয়। সেজন্য বর্তমানে এই পদ্ধতি কেলাসের গঠন নির্ণয়ের কাজে বিশেষ ব্যবহৃত হয় না।

(খ) ব্র্যাগ পদ্ধতি : (6·12) অনুচ্ছেদে 'ব্র্যাগ আয়নন বর্ণালীমাপক' (Bragg Ionization Spectrometer) পদ্ধতিরও আলোচনা করা হয়েছে। সাধারণতঃ তামা ($Z = 29$), মলিবডেনাম ($Z = 42$) প্রভৃতি লক্ষ্যবস্তু থেকে নিঃসৃত K-রশ্মি ব্যবহার করা হয়। ব্র্যাগ পদ্ধতিতে একবর্ণী X-রশ্মি ব্যবহার করা হয় এবং আয়নন কক্ষের সাহায্যে প্রতিফলিত রশ্মির তীব্রতা মাপা হয়। কেলাসটিকে অল্প অল্প পরিমাণে ঘুরিয়ে সংগে সংগে আয়নন কক্ষটি দ্বিগুণ পরিমাণে ঘোরান হয় এবং কেলাসের প্রত্যেক অবস্থানে আয়নন প্রবাহ মাপা হয়। এই পদ্ধতিতে খুব সঠিক ভাবে তীব্রতা পরিমাপ করা যায়। প্রথম যুগে কতকগুলি অত্যন্ত গুরুত্বপূর্ণ কেলাস গঠন নির্ণয়ের কাজ এই পদ্ধতির সাহায্যে সম্পাদিত হয় (পূর্ব অনুচ্ছেদ দ্রষ্টব্য)। কিন্তু এই পদ্ধতি বেশ আয়াসসাধ্য এবং লাওয়ে পদ্ধতির মত এক্ষেত্রেও একক কেলাস ব্যবহার করার প্রয়োজন। এইসব কারণে বর্তমানে এই পদ্ধতিও কেলাস গঠন নির্ণয়ের কাজে বিশেষ ব্যবহৃত হয় না। অবশ্য X-রশ্মির তরঙ্গদৈর্ঘ্য নির্ণয়ের জন্য এই পদ্ধতি বিশেষ উপযোগী।

(গ) চূর্ণ কেলাস পদ্ধতি : সম্পূর্ণ ত্রুটিশূন্য একক কেলাস (Single Crystal) প্রস্তুত করা বেশ শক্ত। বেশীর ভাগ কেলাসিত পদার্থই অত্যন্ত ক্ষুদ্র ক্ষুদ্র কেলাসের সমষ্টি হিসাবে পাওয়া যায়। এইরূপ অতি ক্ষুদ্র কেলাস ব্যবহার করে কেলাস গঠন নির্ণয়ের জন্য ডিবাই এবং শেরার (Debye and Scherrer) নামক দুই সুইস্ বিজ্ঞানী এবং স্বতন্ত্রভাবে হাল (Hull) নামক আমেরিকান বিজ্ঞানী ১৯১৬-১৭ সালে চূর্ণ কেলাস পদ্ধতি উদ্ভাবিত করেন। এই পদ্ধতিতে একগুচ্ছ একবর্ণী X-রশ্মি একটি ছোট নলের মধ্যে রাখা অতি সূক্ষ্ম কেলাস চূর্ণের উপর আপতিত করা হয়। এই চূর্ণের মধ্যে বহুসংখ্যক অতি ক্ষুদ্রায়তন কেলাস যদৃচ্ছভাবে (At random) বিন্যস্ত থাকে। ফলে সব সময়েই এদের মধ্যে এমন কতকগুলি কেলাস থাকে যে তাদের মধ্যস্থ নির্দিষ্ট তলগুচ্ছ থেকে ব্র্যাগ সমীকরণ অনুযায়ী প্রতিফলন সংঘটিত হতে পারে। ধরা যাক যে $\theta$ তির্যক কোণে (Glancing Angle) এইরূপ প্রতিফলন ঘটে। সুতরাং আপতিত রশ্মির সাপেক্ষে প্রতিফলিত রশ্মিগুলি $2\theta$ অর্ধশীর্ষ কোণ বিশিষ্ট একটি শংকুর (Cone) বক্রতলের উপরে

অবস্থিত থাকবে ( 6·34 চিত্র দ্রষ্টব্য )। নির্দিষ্ট কেলাস তলগুচ্ছ থেকে বিভিন্ন ক্রমের প্রতিফলনের জন্য এইরূপ এক একটি শংকু পাওয়া যায়। আবার বিভিন্ন কেলাস তলগুচ্ছের জন্য পৃথক পৃথক শংকু উৎপন্ন হয়। এই শংকুগুলি আপতিত রশ্মির অভিলম্বে স্থাপিত একটি ফোটোগ্রাফিক প্লেটকে যেখানে ছেদ করে সেইসব স্থানে একটি করে বৃত্তচাপ আকৃতি বিশিষ্ট কৃষ্ণ রেখা উৎপন্ন হয়। এই সমকেন্দ্রিক বৃত্তচাপগুলির ব্যাসার্ধ পরিমাপ করে ব্র্যাগ কোণ $\theta$ পাওয়া যায় এবং তার থেকে কেলাস তল ব্যবধান $d$ নির্ণয় করা হয়। সাধারণতঃ ফোটোগ্রাফিক প্লেটের পরিবর্তে বেলনের আকারে পাকান ফোটোগ্রাফিক ফিল্‌ম ব্যবহার করা হয়। ফলে যে সব ব্যর্তিত রশ্মির জন্য

চিত্র 6·34

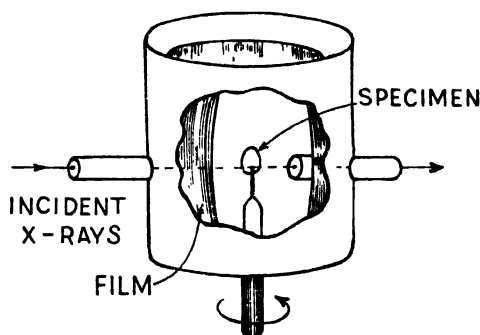
ডিবাই-শেরার পদ্ধতিতে চূর্ণ কেলাস দ্বারা X-রশ্মি ব্যবর্তন উৎপাদনের নকশা।

$2\theta > 90°$ হয়, সেগুলির দ্বারা উৎপন্ন রেখাগুলিও ফিল্‌মের উপর পাওয়া যায়। (6·35) চিত্রে একটি ডিবাই-শেরার আলোক চিত্রের নিদর্শন দেখান হয়েছে। উক্ত চিত্র থেকে দেখা যায় যে ফিল্‌মের কেন্দ্রস্থল থেকে যত

চিত্র 6·35
ডিবাই-শেরার আলোকচিত্র।

বাইরের দিকে যাওয়া যায়, রেখাগুলির বক্রতা তত কম হতে থাকে। অবশেষে যখন $2\theta = 90^\circ$ হয়, তখন উৎপন্ন রেখাগুলি সরলরেখা হয়ে যায়। যখন $2\theta > 90^\circ$ হয়, তখন রেখাগুলির বক্রতা বহির্মুখী হয়, কারণ তখন উৎপন্ন শংকুগুলি পশ্চাদভিমুখী হয়।

কতকগুলি বিশেষ ধরনের সরল গঠন সম্পন্ন কেলাসের গঠন নির্ণয়ের জন্য চূর্ণ কেলাস পদ্ধতি (Powder Crystal Method) বিশেষ উপযোগী, যথা ধাতু বা সংকর ধাতুর (Alloy) কেলাসের ক্ষেত্রে। এগুলির অপেক্ষাকৃত বৃহদায়তন একক কেলাস প্রস্তুত করা প্রায় অসম্ভব। বর্তমানে অবশ্য বেশির ভাগ ক্ষেত্রেই নিম্নে আলোচিত 'আবর্তন আলোকচিত্র' (Rotation Photograph) পদ্ধতি ব্যবহার করে কেলাস গঠন নির্ণয় করা হয়।

**(ঘ)** আবর্তন আলোকচিত্র পদ্ধতি ঃ

এই পদ্ধতিতে এক মিলিমিটার অপেক্ষা ক্ষুদ্রতর বাহু বিশিষ্ট একক কেলাসকে কোন একটি কেলাস-অক্ষ বেষ্টন করে আবর্তিত করা হয়। একটি বেলনাকৃতি ফোটোগ্রাফিক ফিল্ম কেলাসটিকে বেষ্টন করে স্থাপিত করা হয় ( 6·36 চিত্র দ্রষ্টব্য )। বেলনের অক্ষ এবং কেলাসের আবর্তন অক্ষ একই হওয়া প্রয়োজন। এই আবর্তন অক্ষের অভিলম্বে একবর্ণী X-রশ্মি আপতিত

চিত্র 6·36

X-রশ্মি ব্যবর্তন পরীক্ষার জন্য আবর্তন আলোকচিত্র পদ্ধতি।

করা হয়। কেলাসটিকে ধীরগতিতে আবর্তিত করলে একের পর এক বিভিন্ন কেলাস তলগুচ্ছ ব্র্যাগ সমীকরণ অনুযায়ী আপতিত X-রশ্মিগুচ্ছকে প্রতিফলিত করার জন্য প্রয়োজনীয় অবস্থানে আসে। ফলে প্রত্যেক তলগুচ্ছ থেকে অল্প

সময়ের জন্য প্রতিফলিত রশ্মি ফোটোগ্রাফিক ফিল্‌মের উপর আপতিত হয়। কেলাসটিকে বারবার আবর্তিত করার জন্য অবশেষে ফিল্‌মের উপর যথেষ্ট তীব্রতা সম্পন্ন বিন্দু উৎপন্ন হয়। বিভিন্ন তল থেকে প্রতিফলিত রশ্মির জন্য ফিল্‌মের উপর বিভিন্ন স্থানে কতকগুলি কৃষ্ণ বিন্দু উৎপন্ন হয়। এইভাবে উৎপন্ন বিন্দুগুলির নকশাকে 'আবর্তন আলোকচিত্র' (Rotation Photograph) বলা হয়। উল্লম্ব (Vertical) আবর্তন অক্ষের সমান্তরালে অবস্থিত কেলাস তলগুলি থেকে অনুভূমিক (Horizontal) তলে প্রতিফলন সংঘটিত হয়। এইরূপ প্রতিফলনের ফলে উৎপন্ন কৃষ্ণ বিন্দুসমূহ ফিল্‌মের উপরে বৃত্তাকার নিরক্ষ রেখা (Equatorial Line) বরাবর অবস্থিত থাকে। অন্যভাবে বিন্যস্ত তলগুলি থেকে প্রতিফলনের ফলে উৎপন্ন কৃষ্ণ বিন্দুসমূহ নিরক্ষ রেখার সমান্তরাল কতকগুলি নির্দিষ্ট বৃত্তাকার রেখা বরাবর অবস্থিত থাকে। পরীক্ষা সম্পূর্ণ হবার পরে ফিল্‌মটিকে বিকসিত করে সমতলে স্থাপিত করলে ঐ রেখাগুলিকে অনুভূমিক সরলরেখা হিসাবে দেখা যায়।

পরবর্তী যুগে আবর্তন আলোকচিত্র পদ্ধতির নানাবিধ উন্নতি সাধন করা হয়। অনেক সময় কেলাসটিকে 360° কোণে বারবার আবর্তিত না করে সীমিত কৌণিক সীমার মধ্যে পর্যাবৃত্ত ভাবে ধীরগতিতে আন্দোলিত করা হয়। এর ফলে বিভিন্ন তলগুচ্ছ থেকে প্রতিফলিত রশ্মি কর্তৃক উৎপন্ন কৃষ্ণ বিন্দুগুলির অধ্যাপতনের (Overlapping) সম্ভাবনা কম হয়।

ভাইসেনবার্গ (Weissenberg) নামক বিজ্ঞানী এই পদ্ধতিকে আরও উন্নত করেন। তাঁর পদ্ধতিতে কেলাসটিকে 180° কৌণিক সীমার মধ্যে আন্দোলিত করা হয়। সংগে সংগে ফিল্‌ম সমেত বেলনাকৃতি ক্যামেরাটিকেও নির্দিষ্ট বেগে কেলাসের আবর্তন গতির সংগে সমলয়ে (Synchronously) সামনের এবং পিছনের দিকে পর্যাবৃত্তভাবে গতিশীল করা হয়। প্রতিফলনের জন্য ফিল্‌মের উপরে উৎপন্ন কৃষ্ণ বিন্দুগুলির অবস্থান থেকে প্রতিফলন কোণ, প্রতিফলক কেলাস তলের অবস্থান প্রভৃতি সম্বন্ধে খুব সঠিক তথ্য পাওয়া যায়। কেলাস গঠন নির্ণয়ের কাজে এই পদ্ধতি বিশেষ সুবিধাজনক।

### 6·17 : X-রশ্মির প্রতিসরণ

X-রশ্মি আবিষ্কারের পর রনট্‌গেন, বার্ক্‌লা প্রমুখ বিজ্ঞানীগণ এই রশ্মির প্রতিসরণ নিরীক্ষণ করার চেষ্টা করেন। কিন্তু তাঁদের চেষ্টা সফল হয় নি। ১৯১৯ সালে ষ্টেনষ্টর্ম (Stenstörm) নামক বিজ্ঞানী লক্ষ্য করেন যে ব্র্যাগ

সমীকরণের সাহায্যে নির্ণীত X-রশ্মির তরঙ্গদৈর্ঘ্য বিভিন্ন ক্রমের (Order) প্রতিফলিত রশ্মির ক্ষেত্রে অল্প পরিমাণে পৃথক পাওয়া যায়। তিনি অনুমান করেন যে এই পার্থক্যের কারণ হচ্ছে পরীক্ষার জন্য ব্যবহৃত কেলাসের মধ্যে প্রবেশকালে X-রশ্মি প্রতিসৃত (Refracted) হয়। এই প্রতিসরণের জন্য ব্র্যাগ সমীকরণ সংশোধন করা প্রয়োজন।

পরীক্ষার দ্বারা দেখা যায় যে X-রশ্মির ক্ষেত্রে সকল বস্তুর প্রতিসরণ গুণাংক (Refractive Index) $\mu < 1$ হয়; অর্থাৎ শূন্য মাধ্যম থেকে কোন বাস্তব মাধ্যমে প্রবেশ করার সময়ে X-রশ্মি অভিলম্ব থেকে দূরে অপসৃত হয়, এবং তির্যক প্রতিসরণ কোণ $\theta'$ তির্যক আপতন কোণ $\theta$ অপেক্ষা ক্ষুদ্রতর হয় $(\theta' < \theta)$। দৃশ্যমান আলোকের ক্ষেত্রে $\mu > 1$ হয়। সেইজন্য এইরূপ আলোকের ক্ষেত্রে ঠিক এর বিপরীত হয় অর্থাৎ $\theta' > \theta$ হয়। X-রশ্মির কম্পাংক দৃশ্যমান আলোকের কম্পাংক অপেক্ষা অনেক বেশী হয়, এবং এই কম্পাংক পদার্থের মধ্যে ইলেকট্রনের স্পন্দন কম্পাংকের (বস্তুতঃ আবর্তন কম্পাংকের) তুলনায়ও অনেক বেশী হয়। প্রতিসরণ তত্ত্ব অনুযায়ী $\nu$ কম্পাংক সম্পন্ন আলোকের জন্য কোন বস্তুর প্রতিসরণ গুণাংক $\mu$ নিম্নলিখিত সমীকরণ দ্বারা নির্ধারিত হয়ঃ

$$\mu^2 = 1 + \frac{e^2}{\pi m}\sum \frac{n_i}{(\nu_i^2 - \nu^2)} \qquad (6{\cdot}32)$$

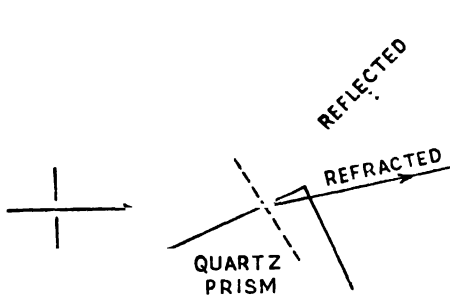
এই সমীকরণকে সেলমায়ার (Sellmier) সমীকরণ বলা হয়। এখানে $e$ এবং $m$ হচ্ছে যথাক্রমে ইলেকট্রনের আধান এবং ভর; $n_i$ হচ্ছে একক আয়তনে $\nu_i$ স্বাভাবিক কম্পাংক সম্পন্ন ইলেকট্রনের সংখ্যা। X-রশ্মির ক্ষেত্রে $\nu >> \nu_i$ হয়। সুতরাং এক্ষেত্রে $\mu < 1$ হয়। $\nu^2$ সংখ্যাটির তুলনায় $\nu_i^2$ উপেক্ষা করলে পাওয়া যায়

$$\mu^2 = 1 - \frac{e^2}{\pi m}\sum_i \frac{n_i}{\nu^2} = 1 - \frac{ne^2}{\pi m \nu^2} = 1 - \frac{ne^2\lambda^2}{\pi mc^2} \qquad (6{\cdot}33)$$

সুতরাং $$\mu = 1 - \frac{ne^2\lambda^2}{2\pi mc^2} \qquad (6{\cdot}34)$$

এখানে $n$ হচ্ছে প্রতি একক আয়তনে বর্তমান ইলেকট্রন সংখ্যা। (6·34) সমীকরণে বিভিন্ন সংখ্যার মান বসালে 0·7 অ্যাং তরঙ্গদৈর্ঘ্য সম্পন্ন X-রশ্মির জন্য ক্যালসাইট কেলাসের ক্ষেত্রে পাওয়া যায়

$$\mu = 1 - 1{\cdot}84 \times 10^{-6}$$

অর্থাৎ প্রতিসরণ গুণাংকের মান এক অপেক্ষা খুব অল্প পরিমাণে কম হয়। সুতরাং X-রশ্মির ক্ষেত্রে বিভিন্ন কঠিন পদার্থের প্রতিসরণ গুণাংক এবং বায়ুর প্রতিসরণ গুণাংকের মধ্যে পার্থক্য খুবই কম। সেইজন্য এক্ষেত্রে

চিত্র 6·37

X-রশ্মির প্রতিসরণ পর্যবেক্ষণের জন্য পরীক্ষা ব্যবস্থা।

কঠিন পদার্থের প্রতিসরণ গুণাংক পরিমাপ করা বেশ কঠিন। সীগ্‌বান (M. Siegbahn) এবং তাঁর সহযোগীগণ স্ফটিক (Quartz) নির্মিত প্রিজ্‌মের সাহায্যে X-রশ্মির প্রতিসরণ জনিত বিচ্যুতি নির্ণয় করতে সমর্থ হন। তাঁদের পরীক্ষায় ( 6·37 চিত্র দ্রষ্টব্য ) একগুচ্ছ সমান্তরিত একবর্ণী X-রশ্মি একটি স্ফটিক প্রিজ্‌ম তলের উপর খুব স্বল্পমান স্পর্শকোণে (Grazing Angle) আপতিত করান হয়। আলোকচিত্রের সাহায্যে তাঁরা প্রতিসৃত রশ্মির বিচ্যুতি প্রদর্শিত করতে সমর্থ হন। এই পদ্ধতির দ্বারা বর্তমানে খুব সঠিক ভাবে X-রশ্মির তরঙ্গদৈর্ঘ্য নিরূপণ করা হয়।

## 6·18 : রেখাংকিত ঝাঁঝরির সাহায্যে X-রশ্মির তরঙ্গদৈর্ঘ্য নিরূপণ

যেহেতু X-রশ্মির ক্ষেত্রে সকল বস্তুর প্রতিসরণ গুণাংক $\mu < 1$ হয়, অতএব বায়ু থেকে কোন কঠিন মাধ্যমে প্রবেশ করার সময় X-রশ্মির পূর্ণ প্রতিফলন (Total Reflection) হতে পারে। দৃশ্যমান আলোকের ক্ষেত্রে এর ঠিক বিপরীত হয়, অর্থাৎ কঠিন মাধ্যম থেকে বায়ুতে যাবার সময় দৃশ্যমান আলোকের পূর্ণ প্রতিফলন হয়। যদি X-রশ্মির পূর্ণ প্রতিফলনের জন্য 'সংকট তির্যক কোণের' (Critical Glancing Angle) মান হয় $\theta_c$, তাহলে $\mu = \cos\theta_c$ লেখা যায়। যদি আপতন

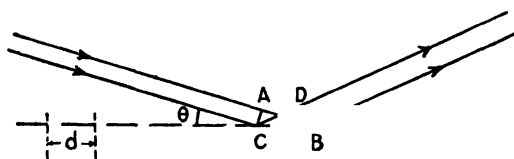
তির্যক কোণ $\theta < \theta_c$ হয়, তাহলে প্রতিসরণের পরিবর্তে পূর্ণ প্রতিফলন ঘটবে। যেহেতু $\theta_c$ খুব ক্ষুদ্র সংখ্যা, অতএব আমরা লিখতে পারি

$$\mu = \cos\theta_c = 1 - \theta_c^2/2$$

সমীকরণ (6·34) থেকে পাওয়া যায়

$$\theta_c = \sqrt{2(1-\mu)} = \sqrt{\frac{ne^2}{\pi mc^2}}. \qquad (6{\cdot}35)$$

0·7 অ্যাং X-রশ্মির জন্য ক্যালসাইট কেলাসের উপরে প্রদত্ত $\mu$ এর মান থেকে পাওয়া যায় $\theta_c \approx 0{\cdot}1^\circ$ ( প্রায় )। কম্পটন (A. H. Compton) ১৯২২ সালে একগুচ্ছ সূক্ষ্ম সমান্তরিত X-রশ্মি একটি কাঁচের প্লেটের উপরিতল থেকে পূর্ণ প্রতিফলন করাতে সমর্থ হন। সংকট কোণ $\theta_c$ পরিমাপ করে (6·35) সমীকরণ থেকে তিনি X-রশ্মির জন্য কাঁচের $\mu$ নির্ণয় করেন। কম্পটন দেখান যে পরিমিত সংকট কোণ $\theta_c$ তরঙ্গদৈর্ঘ্যের এবং কেলাসের ঘনত্বের বর্গমূলের সমানুপাতিক। এই তথ্যগুলি (6·35) সমীকরণের সংগে সংগতিপূর্ণ।

পরে কম্পটন এবং তাঁর সহযোগীগণ ধাতব তলের উপর রেখাংকিত করে একটি ব্যবর্তন-ঝাঁঝরি নির্মাণ করেন। এই ঝাঁঝরির উপরে অংকিত পাশাপাশি দুটি রেখার মধ্যবর্তী স্থানগুলি ব্যবর্তন কেন্দ্র (Diffraction Centre) হিসাবে কাজ করে। খুব স্বল্প মান স্পর্শকোণে $(\theta < \theta_c)$ যত্ন সহকারে সমান্তরিত X-রশ্মিগুচ্ছ আপতিত করলে পূর্ণ প্রতিফলন হয়।

চিত্র 6·38

রেখাংকিত ঝাঁঝরির সাহায্যে X-রশ্মির তরঙ্গদৈর্ঘ্য নিরূপণ।

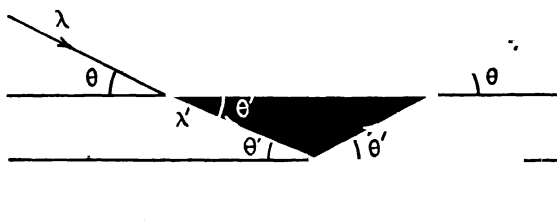
প্রতিফলিত রশ্মিগুলি দৃশ্যমান আলোকের মত ব্যবর্তন নক্শা (Diffraction Pattern) উৎপন্ন করে। যদি 'আপতন তির্যক কোণ' হয় $\theta$, 'প্রতিফলন তির্যক কোণ' হয় $(\theta + \alpha)$ এবং ঝাঁঝরি-ব্যবধান (Grating Space) হয়

$d$, তাহলে (6·38) চিত্র থেকে দেখা যায় যে পরপর দুটি ব্যবর্তন কেন্দ্র থেকে ব্যবর্তিত রশ্মির মধ্যে পথ ব্যবধান হয় ঃ

$$AB - CD = d\{\cos\theta - \cos(\theta + \alpha)\} = n\lambda \tag{6·36}$$

এখানে $n$ সংখ্যাটি শূন্য অথবা ধনাত্মক বা ঋণাত্মক পূর্ণ সংখ্যা হতে পারে। ঝাঁঝরি-ব্যবধান $d$ বেশ নির্ভুল ভাবে মাপা যায়। সাধারণতঃ প্রতি সেণ্টিমিটারে প্রায় 500 রেখা সম্পন্ন ঝাঁঝরি ব্যবহার করা হয়। এই পদ্ধতিতে নির্ণীত X-রশ্মির তরঙ্গদৈর্ঘ্য অন্যান্য পরিমাপের সংগে বেশ ভাল ভাবে মিলে যায়।

### 6·19 : প্রতিসরণের জন্য ব্র্যাগ সমীকরণের সংশোধন

মনে করা যাক যে $\lambda$ তরঙ্গদৈর্ঘ্য সম্পন্ন একবর্ণী সমান্তরাল X-রশ্মিগুচ্ছ একটি কেলাসের উপরিতলে $\theta$ তির্যক কোণে আপতিত হয়। কেলাসের মধ্যে প্রবেশ করার পর প্রতিসরণের জন্য আপতিত রশ্মির তরঙ্গদৈর্ঘ্য

চিত্র 6·39
কেলাসের অভ্যন্তরে X-রশ্মি প্রতিফলন।

পরিবর্তিত হয়ে $\lambda'$ হয়, এবং প্রতিসরণ কোণ $\theta'$ হয়। স্পষ্টতঃ কেলাসের অভ্যন্তরে কেলাস তলের উপর আপতন এবং প্রতিফলন কোণের মানও $\theta'$ হয় ( 6·39 চিত্র দ্রষ্টব্য )। যদি $\mu$ হয় প্রতিসরণ গুণাংক, তাহলে

$$\mu = \frac{\lambda}{\lambda'} = \frac{\cos\theta}{\cos\theta'}$$

কেলাসের অভ্যন্তরে প্রযোজ্য ব্র্যাগ সমীকরণকে লেখা যায়

$$n\lambda' = 2d\sin\theta'$$

যেহেতু $\sin\theta' = \sqrt{1-\cos^2\theta'} = \sqrt{1-\cos^2\theta/\mu^2}$

$$= \frac{\sqrt{\mu^2 - \cos^2\theta}}{}$$

অতএব $n\lambda' = \frac{2d}{\mu}\sqrt{\mu^2 - \cos^2\theta}$

আবার যেহেতু $\lambda' = \lambda/\mu$ হয়, অতএব

$$n\lambda = 2d\sqrt{\mu^2 - \cos^2\theta} = 2d \sin\theta \left[1 - \frac{1-\mu^2}{\sin^2\theta}\right]^{\frac{1}{2}} \quad (6{\cdot}37)$$

যেহেতু $1-\mu^2 << 1$, অতএব আমরা লিখতে পারি

$$1-\mu^2 = (1-\mu)(1+\mu) \simeq 2(1-\mu)$$

সুতরাং আমরা পাই

$$n\lambda = 2d \sin\theta \left[1 - \frac{1}{2}\cdot\frac{1-\mu^2}{\sin^2\theta}\right]$$

$$= 2d \sin\theta \left[1 - \frac{1-\mu}{\sin^2\theta}\right] \quad (6{\cdot}38)$$

সমীকরণ (6·37) বা (6·38) হচ্ছে সংশোধিত ব্র্যাগ সমীকরণ। সংশোধনের পরিমাণ নির্ভর করে $\delta = (1-\mu)$ এর মানের উপর। যেহেতু $\delta$ খুব ছোট, অতএব (6·38) সমীকরণের শুদ্ধিপদে অসংশোধিত ব্র্যাগ সমীকরণ থেকে প্রাপ্ত $\sin^2\theta$ সংখ্যাটির মান বসান যায়ঃ

$$\sin^2\theta \simeq n^2\lambda^2/4d^2$$

সুতরাং পরিশেষে পাই

$$n\lambda = 2d \sin\theta \left[1 - \frac{4d^2\delta}{n^2\lambda^2}\right] \quad (6{\cdot}39)$$

$n$ যত উচ্চ হয়, শুদ্ধি পদটি তত ছোট হয়; কাজেই উচ্চ ক্রমের ব্যবর্তনের ক্ষেত্রে অসংশোধিত ব্র্যাগ সমীকরণ ব্যবহার করা যেতে পারে।

## পরিচ্ছেদ—৭

# পদার্থের তরঙ্গরূপ

### 7·1 : সূচনা

ইতিপূর্বে দেখা গেছে যে আলোক-তাড়িত ক্রিয়া, কম্পটন বিক্ষেপ প্রভৃতি পরীক্ষা থেকে আলোকের কণিকাস্বরূপ প্রকাশিত হয়। আবার ব্যতিচার (Interference), ব্যবর্তন (Diffraction) প্রভৃতি পরীক্ষা থেকে আলোকের তরঙ্গরূপও প্রকাশ পায়। অর্থাৎ আলোকের দ্বৈত সত্তা (Dual Nature) আছে। কম্পটন বিক্ষেপের তত্ত্ব থেকে আমরা আলোক কণিকা বা ফোটনের ভরবেগ পাই ঃ

$$p = \frac{h\nu}{c} = \frac{h}{\lambda} \qquad (7{\cdot}1)$$

এখানে $h$ হচ্ছে প্ল্যাংক ধ্রুবক এবং $\lambda$ হচ্ছে আলোকের তরঙ্গদৈর্ঘ্য। সমীকরণ (7·1) দ্বারা আলোকের দ্বৈত সত্তার মধ্যে একটা গাণিতিক সম্পর্ক নির্ধারিত হয়। কারণ ভরবেগ $p$ হচ্ছে মূলতঃ কণিকার একটি গতীয় ধর্ম, আর তরঙ্গদৈর্ঘ্য $\lambda$ হচ্ছে তরঙ্গের ধর্ম নির্দেশক একটি সংখ্যা।

আলোকের এই দ্বৈত স্বরূপের কথা বিবেচনা করে প্রখ্যাত ফরাসী বিজ্ঞানী লুই দ্য ব্রয় (Louis de Broglie) অনুমান করেন যে এইরূপ দ্বৈত সত্তা শুধু আলোকের নয় বস্তু কণিকার ক্ষেত্রেও থাকতে পারে। অর্থাৎ বস্তু কণিকাগুলিও কখনও কখনও তরঙ্গের ন্যায় আচরণ করতে পারে। ১৯২৪ সালে তাঁর এই মতবাদ প্রকাশিত হয়। এই মতবাদ অনুসারে (7·1) সমীকরণের সাহায্যে বস্তু কণিকার ক্ষেত্রেও তাদের দ্বৈত সত্তার মধ্যেকার গাণিতিক সম্পর্ক নির্ধারিত হয়। অর্থাৎ যদি বস্তু কণিকার তরঙ্গরূপ আছে মনে করা যায়, তাহলে এর তরঙ্গদৈর্ঘ্য $\lambda$ এবং ভরবেগ $p$ এর মধ্যে সম্পর্ক নিরূপিত হবে (7·1) সমীকরণের সাহায্যে। বস্তু কণিকার ক্ষেত্রে এই সমীকরণ থেকে পাওয়া যায়

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{mv} \qquad (7{\cdot}2)$$

এখানে $m$ হচ্ছে কণিকাটির ভর এবং $v$ হচ্ছে এর বেগ।

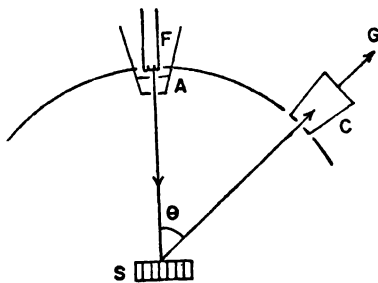
দ্য ব্রয় যখন তাঁর মতবাদ প্রকাশিত করেন তখন বস্তু কণিকার তরঙ্গ সত্তার অস্তিত্বের কোন পরীক্ষামূলক প্রমাণ ছিল না। ১৯২৭ সালে ডেভিসন এবং গার্মার (Davisson and Germer) নামক আমেরিকান বিজ্ঞানীদ্বয় সর্বপ্রথম ইলেকট্রনের তরঙ্গস্বরূপ পরীক্ষার দ্বারা প্রদর্শিত করেন। প্রায় একই সময়ে (১৯২৮ সালে) ইংলণ্ডে টমসন (G. P. Thomson) নামক বিজ্ঞানীও স্বতন্ত্র ভাবে ইলেকট্রনের তরঙ্গ সত্তার অস্তিত্ব পরীক্ষা দ্বারা প্রমাণিত করেন।

## 7·2 : ডেভিসন এবং গার্মারের পরীক্ষা

ডেভিসন এবং গার্মার নিকেল ধাতু থেকে ইলেকট্রন বিক্ষেপ (Scattering) সম্বন্ধীয় পরীক্ষা অনুষ্ঠিত করতে গিয়ে আকস্মিক ভাবে ইলেকট্রনের তরঙ্গ সত্তার নিদর্শন পান। তাঁদের পরীক্ষায় নিকেল বিক্ষেপকটি (Scatterer) খুব নিম্ন বায়ু চাপে রাখা একটি আধারের মধ্যে অবস্থিত ছিল। পরীক্ষা অনুষ্ঠিত করার সময়ে কোন কারণে উক্ত আধারের মধ্যে বায়ু প্রবেশ করে যায়। আপতিত ইলেকট্রনগুচ্ছের সংঘাতে উত্তপ্ত নিকেলটির উপরিভাগ অক্সিজেনের সংগে বিক্রিয়ার ফলে নিকেল-অক্সাইডে পরিণত হয়। বিক্ষেপক নিকেলের উপর থেকে এই অক্সাইডের আচ্ছাদন (Coating) বিদূরিত করার জন্য তাঁরা সেটিকে খুব উচ্চ উষ্ণতা সম্পন্ন চুল্লীতে (Oven) রেখে উত্তপ্ত করতে থাকেন। দীর্ঘ সময় ধরে এইভাবে উত্তপ্ত করার ফলে বিক্ষেপকটি নিকেলের কয়েকটি অপেক্ষাকৃত বৃহদায়তন একক কেলাসের (Single Crystals) সমষ্টিতে রূপান্তরিত হয়ে যায়।

নিকেলটি এইভাবে রূপান্তরিত হওয়ার পূর্বে বিভিন্ন দিকে বিক্ষিপ্ত ইলেকট্রনের সংখ্যা নিরূপিত করে তাঁরা লক্ষ্য করেন যে বিক্ষেপ কোণ বৃদ্ধির সংগে বিক্ষিপ্ত ইলেকট্রনের সংখ্যা নিরবচ্ছিন্নভাবে (Continuously) হ্রাস পায়। কিন্তু উপরোক্ত রূপান্তরিত নিকেল কেলাস থেকে বিক্ষিপ্ত ইলেকট্রনের সংখ্যা কতকগুলি নির্দিষ্ট দিকে বৃহত্তম হয়, আবার অন্য কয়েকটি নির্দিষ্ট দিকে ন্যূনতম হয়। অর্থাৎ ইলেকট্রনগুলি যেন নিকেল কেলাস থেকে ব্যবর্তিত (Diffracted) হতে থাকে।

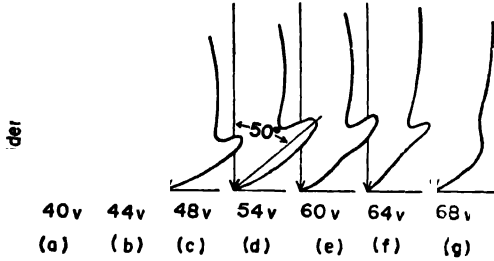
ডেভিসন এবং গার্মার পরে একটি নিকেলের একক কেলাস নিয়ে অনুরূপ পরীক্ষা করেন। তাঁদের পরীক্ষা পদ্ধতি (7·1) চিত্রে প্রদর্শিত হয়েছে। F একটি উত্তপ্ত ধাতব তন্তু, যার থেকে নিঃসৃত তাপীয় ইলেকট্রনগুলি সূক্ষ্ম

অক্ষীয় ছিদ্র বিশিষ্ট ধাতু নির্মিত A অ্যানোডের দ্বারা আকৃষ্ট হয়ে ছিদ্রের অপরদিকে সমান্তরিত গুচ্ছ হিসাবে নির্গত হয়। এই ধরনের ইলেকট্রন নিঃসারককে বলা যায় 'ইলেকট্রন-কামান' (Electron Gun)। তন্তু এবং

চিত্র 7·1

ডেভিসন ও গার্মার কর্তৃক অনুষ্ঠিত ইলেকট্রন ব্যবর্তন উৎপাদনের পরীক্ষা ব্যবস্থা।

এবং অ্যানোডের মধ্যেকার বিভব প্রভেদ ($V$) পরিমাপ করে 'ইলেকট্রন-কামান' থেকে নির্গত ইলেকট্রনের শক্তি ($eV$) জানা যায়। নির্গত ইলেকট্রনগুচ্ছ S নিকেল কেলাসটির উপর আপতিত হয়। বিভিন্ন দিকে বিক্ষিপ্ত ইলেকট্রনগুচ্ছের তীব্রতা C ফ্যারাডে-সংগ্রাহকের সাহায্যে নির্ণয় করা যায়। এই সংগ্রাহকটি এমন ভাবে প্রস্তুত যে কেবল আপতিত ইলেকট্রনের সমশক্তি সম্পন্ন দ্রুততম বিক্ষিপ্ত ইলেকট্রনগুলি এর মধ্যে প্রবেশ করতে পারে। আপতিত ইলেকট্রনের আঘাতে কেঁলাসের দেহ থেকে বিচ্ছিন্ন অপেক্ষাকৃত কম শক্তি সম্পন্ন ইলেকট্রনসমূহ সংগ্রাহকের মধ্যে প্রবেশ করতে পারে না। সংগ্রাহকের সংগে সংযুক্ত একটি সুবেদী (Sensitive) গ্যালভ্যানোমিটারের সাহায্যে বিক্ষিপ্ত ইলেকট্রন জনিত তড়িৎ প্রবাহ পরিমাপ করা যায়। স্পষ্টতঃ এই প্রবাহের মাত্রা বিক্ষিপ্ত ইলেকট্রনের সংখ্যার সমানুপাতিক। C সংগ্রাহকের অবস্থান পরিবর্তন করে বিভিন্ন দিকে বিক্ষিপ্ত ইলেকট্রনের সংখ্যা নিরূপণ করা যায়।

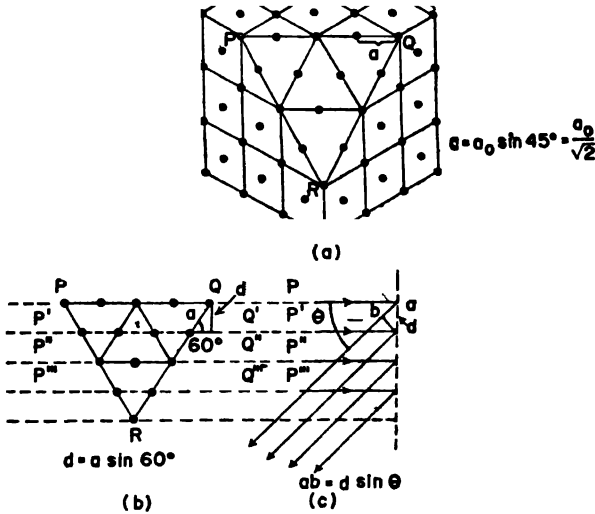
ডেভিসন এবং গার্মারের পরীক্ষায় সমান্তরিত ইলেকট্রনগুচ্ছ নিকেল-কেলাস তলের উপর লম্বভাবে আপতিত করা হয়। আপতিত রশ্মিকে অক্ষ করে কেলাসটিকে ঘুরিয়ে বিভিন্ন দিগংশে (Azimuth) স্থাপিত করা যায়। এইরূপ একটি নির্দিষ্ট দিগংশে স্থাপিত কেলাস থেকে বিভিন্ন দিকে বিক্ষিপ্ত

ইলেকট্রন সংখ্যার পরিবর্তন ধ্রুবীয় লেখচিত্রের (Polar Graph) সাহায্যে (7·2) চিত্রে দেখান হয়েছে। এই চিত্রে দূরকের (Radius Vector) দৈর্ঘ্য বিক্ষিপ্ত ইলেকট্রন সংখ্যার সমানুপাতিক। দূরক এবং কোটির

চিত্র 7·2

ডেভিসন ও গার্মার কর্তৃক প্রাপ্ত ধ্রুবীয় লেখচিত্র। এই চিত্রে দূরকের দৈর্ঘ্য বিক্ষিপ্ত ইলেকট্রনের তীব্রতার সমানুপাতিক। দূরক এবং অক্ষের অন্তর্গত কোণ হচ্ছে বিক্ষেপ কোণ।

অন্তর্গত কোণ হচ্ছে বিক্ষেপ কোণ। প্রথম লেখচিত্রটি ( $7\cdot2a$ চিত্র ) পাওয়া যায় যখন তন্তু এবং অ্যানোডের মধ্যে বিভব প্রভেদ 40 ভোল্ট রাখা হয়। এক্ষেত্রে একটি শাখা-প্রশাখাহীন মসৃণ (Smooth) লেখচিত্র পাওয়া যায়। F এবং A এর মধ্যে ক্রমবর্ধমান বিভব প্রভেদের জন্য প্রাপ্ত লেখচিত্রগুলি (7·2) চিত্রে পরপর দেখান হয়েছে। 44 ভোল্ট বিভব প্রভেদে লেখচিত্রে একটি ছোট শাখার (Spur) আবির্ভাব হয়, প্রায় 60° কোণে। বিভব প্রভেদ যত বাড়ান যায়, এই শাখাটির দৈর্ঘ্য তত বাড়তে থাকে এবং যে কোণে শাখাটির আবির্ভাব হয়, সেই কোণের মানও পরিবর্তিত হয়। 54 ভোল্ট বিভব প্রভেদে শাখাটি দীর্ঘতম হয় এবং এক্ষেত্রে কোণের মান হয় 50° ( $7\cdot2d$ চিত্র দ্রষ্টব্য )। আরও উচ্চ বিভব প্রভেদে শাখাটির দৈর্ঘ্য আবার কমতে থাকে এবং অবশেষে 68 ভোল্ট অপেক্ষা উচ্চতর বিভব প্রভেদে শাখাটির আর কোন চিহ্ন থাকে না।

($7\cdot2d$) চিত্রে প্রদর্শিত 54 ভোল্ট বিভব প্রভেদে 50° কোণে এইরূপ সুতীক্ষ্ণ শাখার আবির্ভাব নিকেল কেলাস থেকে ইলেকট্রনের ব্যবর্তন ঘটার নিদর্শন। নিকেল কেলাসটির উপরিতলে পরমাণুগুলির নিয়মানুযায়ী অবস্থানের ফলে সেটি একটি ব্যবর্তন-ঝাঁঝরির (Diffraction Grating)

মত কাজ করে। X-রশ্মির সাহায্যে নিকেল কেলাসের গঠন নির্ণয় করা হয়েছে। এর একক-কোষের আকৃতি হচ্ছে তল-কেন্দ্রিক ঘনকের (Face Centred Cube) মত। ডেভিসন এবং গার্মারের পরীক্ষায় এই ঘনকের কর্ণের অভিলম্বে বিন্যস্ত তল বরাবর কেলাসটিকে বিদীর্ণ করা হয় ( 7·3 চিত্র দ্রষ্টব্য )। এই তলের সংগে লম্বভাবে ইলেকট্রনগুচ্ছ আপতিত করা হয়।

চিত্র 7·3

(a) তলকেন্দ্রিক ঘনকাকৃতি নিকেল কেলাসের চিত্ররূপ ; (b) নিকেল কেলাসের কর্ণের অভিলম্বে অবস্থিত ছেদতলের মধ্যে পরমাণুগুলির বিন্যাস ; (c) উক্ত তল থেকে ইলেকট্রন বিক্ষেপের চিত্ররূপ।

ঘনকাকৃতি একক-কোষের বাহুগুলির দৈর্ঘ্য হচ্ছে $a_0 = 3{\cdot}51$ অ্যাং। (7·3) চিত্র থেকে সহজেই বোঝা যায় যে কেলাসের ত্রিভুজাকৃতি ছেদ-তলের উপরে পরমাণুগুলির পারস্পরিক দূরত্ব হচ্ছে

$$a = \frac{\quad}{\sqrt{2}}$$

স্পষ্টতঃ এই তলে পরমাণুগুলি PQR সমকোণী ত্রিভুজের যে কোন একটি বাহুর সমান্তরালে বিন্যস্ত থাকে। এই ধরনের প্রত্যেকটি পরমাণুর সারি

( যথা PQ, P′Q′, ইত্যাদি ) যেন একটি সমতল ব্যবর্তন-ঝাঁঝরির উপর অংকিত রেখাগুলির সমতুল্য। এই সারিগুলির পারস্পরিক দূরত্ব হচ্ছে ( 7·3 চিত্র দ্রষ্টব্য )

$$d = a \sin 60^\circ = \frac{a_0}{\sqrt{2}} \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} = \sqrt{\frac{3}{8}} a_0 = 2{\cdot}15 \text{ অ্যাং} \qquad (7{\cdot}3)$$

স্পষ্টতঃ এই তলের উপর লম্বভাবে আপতিত রশ্মি যখন $\theta$ কোণে বিক্ষিপ্ত হয়, তখন পরপর দুটি সারি থেকে বিক্ষিপ্ত রশ্মির মধ্যেকার পথ ব্যবধান $ab = d \sin \theta$ হয়। ব্যতিচারের নিয়মানুযায়ী বিক্ষিপ্ত রশ্মিগুলির মধ্যে সংগঠনমূলক ব্যতিচার (Constructive Interference) ঘটবার শর্ত হচ্ছে

$$d \sin \theta = n\lambda \qquad (7{\cdot}4)$$

এখানে $n = 1, 2, 3, \ldots$ ইত্যাদি। $\lambda$ হচ্ছে আপতিত ইলেকট্রনগুলির দ্য ব্রয় তরঙ্গদৈর্ঘ্য, যার মান (7·2) সমীকরণের সাহায্যে নির্ণয় করা যায়।

উপরে দেখা গেছে যে ডেভিসন এবং গার্মারের পরীক্ষা থেকে 54 ভোল্ট বিভব প্রভেদের ক্ষেত্রে পাওয়া যায় $\theta = 50^\circ$ ; অতএব সমীকরণ (7·4) থেকে প্রথম ক্রমের ($n = 1$) ক্ষেত্রে আমরা পাই

$$\lambda = d \sin 50^\circ = 2{\cdot}15 \times 0{\cdot}7760 = 1{\cdot}65 \text{ অ্যাং}$$

আবার (7·2) সমীকরণ থেকে পাওয়া যায়

$$\lambda = \frac{h}{mv} = \frac{h}{\sqrt{2mE}} = \frac{h}{\sqrt{2meV}} \qquad (7{\cdot}5)$$

(7·5) সমীকরণে বিভিন্ন সংখ্যার মান বসালে ইলেকট্রনের ক্ষেত্রে পাওয়া যায়

$$\lambda = \frac{6{\cdot}62 \times 10^{-27}}{\sqrt{(2 \times 9{\cdot}1 \times 10^{-28} \times 4{\cdot}8 \times 10^{-10} \times V/300)}}$$

$$= \sqrt{150/V} = \frac{12{\cdot}26}{V} \text{ অ্যাং}$$

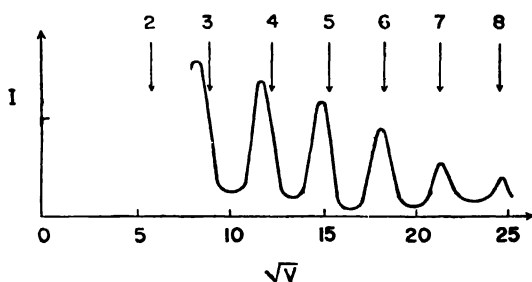
এখানে $V$-এর একক ভোল্ট ধরা হয়েছে। যখন $V = 54$ ভোল্ট হয়, তখন আমরা পাই

$$\lambda = \frac{12{\cdot}26}{\sqrt{54}} = 1{\cdot}67 \text{ অ্যাং}$$

অর্থাৎ ডেভিসন এবং গার্মার কর্তৃক ব্যবর্তন পরীক্ষা দ্বারা নির্ণীত মানের সংগে দ্য ব্রয় সমীকরণ অনুযায়ী নির্ণীত তরঙ্গদৈর্ঘ্যের মান বেশ ভাল ভাবে মিলে যায়। এর থেকে দ্য ব্রয়ের পদার্থ-তরঙ্গ সম্পর্কিত মতবাদের সঠিকতা প্রমাণিত হয়।

## 7·3 : ডেভিসন এবং গার্মারের দ্বিতীয় পরীক্ষা

উপরে বর্ণিত যন্ত্র ব্যবহার করে ডেভিসন এবং গার্মার আর এক প্রকার পরীক্ষা করেন। এই পরীক্ষায় সমান্তরাল ইলেকট্রনগুচ্ছ কেলাস তলের উপর তির্যকভাবে আপতিত করা হয় এবং সংগ্রাহক C এমন ভাবে স্থাপিত করা হয় যে কেলাসের অভ্যন্তরে আপতন এবং প্রতিফলন কোণ সমান হয়। বিভব প্রভেদ পরিবর্তন করে আপতিত ইলেকট্রনের শক্তি পরিবর্তিত করা হয় এবং নির্দিষ্ট দিকে ($\theta =$ ধ্রুবক) প্রতিফলিত ইলেকট্রন প্রবাহ (অর্থাৎ ইলেকট্রনগুচ্ছের তীব্রতা) পরিমাপ করা হয়। এই তীব্রতা ($I$) এবং বিভব প্রভেদের বর্গমূলের ($\sqrt{V}$) লেখচিত্র (7·4) চিত্রে দেখান হয়েছে। সমীকরণ (7·5) অনুযায়ী $\lambda \propto 1/\sqrt{V}$ হয়; সুতরাং (7·4) লেখচিত্র বস্তুতঃ তরঙ্গদৈর্ঘ্য পরিবর্তনের সংগে প্রতিফলিত ইলেকট্রনগুচ্ছের তীব্রতা পরিবর্তন নির্দেশ করে। এই চিত্র থেকে দেখা যায় যে $V$-এর কতকগুলি নির্দিষ্ট মানে তীব্রতার চূড়া উৎপন্ন হয়। এই

চিত্র 7·4

নির্দিষ্ট কোণে বিক্ষিপ্ত ইলেকট্রনগুচ্ছের তীব্রতা এবং বিভব প্রভেদের বর্গমূলের লেখচিত্র।

সব চূড়া সংশ্লিষ্ট ইলেকট্রনের দ্য ব্রয় তরঙ্গদৈর্ঘ্য (7·5) সমীকরণের সাহায্যে নির্ণয় করা যায়।

এখানে উল্লেখযোগ্য যে উপরে আলোচিত প্রতিফলন প্রকৃতপক্ষে কেলাসের অভ্যন্তরস্থ নির্দিষ্ট তলগুচ্ছ থেকে সংঘটিত হয়, ঠিক যেমন হয় ব্র্যাগ-পদ্ধতিতে X-রশ্মির প্রতিফলন বা ব্যবর্তন। যদি অভিলম্বের সাপেক্ষে আপতন বা প্রতিফলন কোণ $\theta$ হয়, তাহলে ব্র্যাগ সমীকরণ (6·26) অনুযায়ী পাওয়া যায়

$$2D \cos\theta = n\lambda \tag{7·6}$$

$n = 1, 2, 3, \ldots$ ইত্যাদি। এখানে $D$ হচ্ছে কেলাসের অভ্যন্তরে বিভিন্ন তলগুচ্ছের পারস্পরিক দূরত্ব। বস্তুতঃ (7·4) চিত্রের চূড়াগুলির সংশ্লিষ্ট বিভব-প্রভেদ থেকে ইলেকট্রনের দ্য ব্রয় তরঙ্গদৈর্ঘ্যের যে মানগুলি পাওয়া যায় সেগুলি (7·6) সমীকরণ থেকে প্রাপ্ত তরঙ্গদৈর্ঘ্যের সংগে তুলনা করে দ্য ব্রয়ের মতবাদের সত্যতা যাচাই করা যায়। যেহেতু $D$ এবং $\theta$ ধ্রুবক, অতএব (7·6) সমীকরণের ডান দিকে $n\lambda$ গুণফলটি ধ্রুবক হয়। অর্থাৎ (7·4) চিত্রে বিভিন্ন বিভবে ( অর্থাৎ বিভিন্ন তরঙ্গদৈর্ঘ্যে ) উৎপন্ন চূড়াগুলির ক্রমিক সংখ্যা $n$ বিভিন্ন হয়। উদাহরণস্বরূপ প্রথম চূড়াটি যদি $\lambda_1$ তরঙ্গদৈর্ঘ্যের জন্য $n_1$ ক্রমের চূড়া হয়, তাহলে দ্বিতীয়টি $\lambda_2$ তরঙ্গদৈর্ঘ্যের জন্য অন্য কোন ক্রম $n_2$-এর চূড়া হবে। (7·4) সমীকরণ অনুযায়ী $n_1\lambda_1 = n_2\lambda_2$ হতে হবে।

## 7·4 : ইলেকট্রনগুচ্ছের প্রতিসরণ

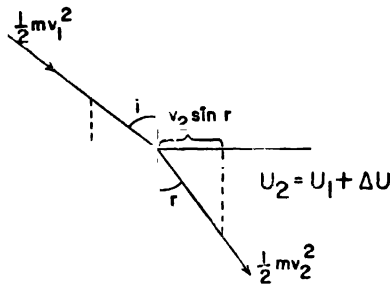
এখানে উল্লেখযোগ্য যে ডেভিসন এবং গার্মারের দুটি পরীক্ষাতেই ইলেকট্রনগুচ্ছের প্রতিসরণ বিবেচনা করা প্রয়োজন। উপরের আলোচনায় এই প্রতিসরণ উপেক্ষা করা হয়েছে। ফলে (7·4) ব্যবর্তন সমীকরণ অথবা (7·6) ব্র্যাগ সমীকরণের সাহায্যে নির্ণীত ইলেকট্রন তরঙ্গদৈর্ঘ্য ($\lambda$) এবং দ্য ব্রয় সমীকরণ (7·5) থেকে প্রতিপন্ন তরঙ্গদৈর্ঘ্যের মধ্যে সব সময় ভাল সংগতি পাওয়া যায় না। উদাহরণস্বরূপ নিকেল কেলাসের উপর তির্যক কোণে আপতিত 83 ই-ভো শক্তি সম্পন্ন ইলেকট্রনগুচ্ছের ক্ষেত্রে ব্যবর্তন চূড়া (Diffraction Peak) পাওয়া যায় যখন আপতিত ও প্রতিফলিত ইলেকট্রনগুচ্ছের অন্তর্গত কোণ $55^\circ$ হয়। সুতরাং ব্র্যাগ সমীকরণ (7·6) থেকে পাওয়া যায় ( $D = 2·03$ অ্যাং )

$$\lambda = \frac{4·06 \cos(90^\circ - 55^\circ)}{n} = \frac{3·33}{n} \text{ অ্যাং}$$

সমীকরণ (7·5) থেকে 83 ই-ভো ইলেকট্রনের দ্য ব্রয় তরঙ্গদৈর্ঘ্য $\lambda = 1{\cdot}34$ অ্যাং হয়। কিন্তু উপরে প্রদত্ত ব্র্যাগ সমীকরণে $n = 1, 2, 3$ প্রভৃতি বিভিন্ন পূর্ণ-সংখ্যা বসালে কোনক্রমেই তরঙ্গদৈর্ঘ্যের এই মান পাওয়া যায় না। এই অসংগতির কারণ হচ্ছে ইলেকট্রনগুচ্ছের প্রতিসরণ।

আলোকের তরঙ্গ তত্ত্ব থেকে জানা আছে যে যখন আলোক তরঙ্গ এক মাধ্যম থেকে দ্বিতীয় আর একটি মাধ্যমে প্রবেশ করে তখন আপতিত আলোক-রশ্মির দিক পরিবর্তিত হয়। প্রতিসরণের সূত্র অনুসারে ($\sin i/\sin r$) অনুপাতটি ধ্রুবক হয়। এই ধ্রুবককে প্রতিসরাংক (Refractive Index) বলা হয়। তরঙ্গ তত্ত্ব থেকে পাওয়া যায় যে যদি প্রথম এবং দ্বিতীয় মাধ্যমে আলোকের বেগ যথাক্রমে $v_1$ এবং $v_2$ হয়, তাহলে প্রতিসরাংক হয়,

$$\lambda = \frac{\sin i}{\sin r} = \frac{v_1}{v_2}$$

ইলেকট্রনগুচ্ছের প্রতিসরণের সময় কিন্তু $\sin i$ এবং $\sin r$ সংখ্যা দুটির অনুপাত ঠিক এর বিপরীত হয়। এই তথ্য সহজেই প্রতিপন্ন করা যায়। মনে করা যাক যে প্রথম মাধ্যমে $\frac{1}{2}mv_1^2$ গতিশক্তি এবং $U_1$ স্থিতিশক্তি

চিত্র 7·5
ইলেকট্রন প্রতিসরণ।

সম্পন্ন একটি ইলেকট্রন $i$ কোণে দুই মাধ্যমের সাধারণ প্রান্তীয় তলের উপর আপতিত হয় ( 7·5 চিত্র দ্রষ্টব্য )। দ্বিতীয় মাধ্যমে ইলেকট্রনটি $r$ কোণে প্রতিসৃত হয়, এবং এই মাধ্যমে এর গতিশক্তি ও স্থিতিশক্তি যথাক্রমে $\frac{1}{2}mv_2^2$ এবং $U_2$ হয়। শক্তি সংরক্ষণ সূত্র অনুযায়ী আমরা পাই

$$\tfrac{1}{2}mv_1^2 + U_1 = \tfrac{1}{2}mv_2^2 + U_2$$

যদি প্রথম মাধ্যম থেকে দ্বিতীয় মাধ্যমে প্রবেশকালে ইলেকট্রনের স্থিতিশক্তির পরিবর্তনকে লেখা যায় $\Delta U = U_1 - U_2$, তাহলে পাওয়া যায়

$$v_2 = v_1 \sqrt{1 + \frac{\Delta U}{\frac{1}{2}mv_1^2}} \qquad (7.7)$$

যদি ধরা যায় যে দুই মাধ্যমের সাধারণ প্রান্তীয় তলের অভিলম্বের দিকে ক্রিয়াশীল বলের জন্য শুধু এই দিকেই ইলেকট্রনের গতিশক্তির পরিবর্তন হয়, তাহলে স্পষ্টতঃ এক মাধ্যম থেকে অন্য মাধ্যমে যেতে ইলেকট্রন বেগের কেবল লম্ব উপাংশ (Normal Component) পরিবর্তিত হয়, সমান্তরাল উপাংশ (Parallel Component) পরিবর্তিত হয় না। সুতরাং আমরা লিখতে পারি ( 7·5 চিত্র দ্রষ্টব্য )

$$v_1 \sin i = v_2 \sin r$$

অথবা
$$\mu = \frac{\sin i}{\sin r} = \frac{v_2}{v_1} \qquad (7.8)$$

সমীকরণ (7·8) থেকে প্রাপ্ত প্রতিসরাংক $\mu$ এর মান তরঙ্গ প্রতিসরণের ক্ষেত্রে প্রাপ্ত মানের ঠিক বিপরীত। অর্থাৎ এক্ষেত্রে প্রতিসরাংক হচ্ছে যথাক্রমে দ্বিতীয় এবং প্রথম মাধ্যমে ইলেকট্রনের বেগের অনুপাতের সমান। সমীকরণ (7·7) এবং (7·8) থেকে পাওয়া যায়

$$\mu = \frac{v_2}{v_1} = \sqrt{1 + \frac{\Delta U}{\frac{1}{2}mv_1^2}} = \sqrt{1 + \frac{\Delta U}{E}} \qquad (7.9)$$

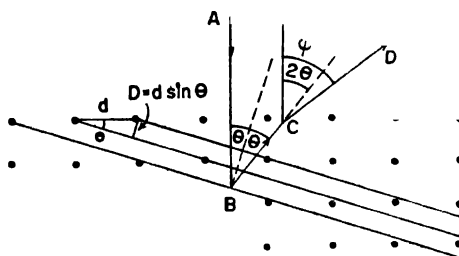
এখানে $E = \frac{1}{2}mv_1^2$ হচ্ছে আপতিত ইলেকট্রনের গতিশক্তি। সাধারণতঃ প্রথম মাধ্যমে আপতিত ইলেকট্রনের মোট শক্তি এর গতিশক্তির সমান ধরা যায়। যদি $V$ বিভব প্রভেদ দ্বারা ত্বরিত (Accelerated) হবার ফলে এই শক্তি ইলেকট্রন কর্তৃক অর্জিত হয়ে থাকে তাহলে $E = eV$ লেখা যায়। তাপীয় ইলেকট্রন নিঃসরণের সময় যেমন ইলেকট্রনকে ধাতু তলের আকর্ষণ কাটাতে হয়, এক মাধ্যম থেকে অন্য মাধ্যমে ( যথা বায়ু থেকে ধাতব মাধ্যমে ) যাবার সময়ও অনুরূপ একপ্রকার বল ইলেকট্রনটির উপর ক্রিয়া করে। এর ফলে ইলেকট্রনের স্থিতিশক্তির পরিবর্তন হয়। যদি দুই মাধ্যমের সাধারণ প্রান্তীয় তল পার হবার সময় ইলেকট্রনটিকে $\Delta V$ বিভব প্রভেদ কাটিয়ে যেতে হয়, তাহলে $\Delta U = e\Delta V$ লেখা যায় ; অতএব আমরা লিখতে পারি

$$\mu = \sqrt{1 + \frac{\Delta V}{V}} \qquad (7.10)$$

প্রতিসরাংক $\mu$ পরিমাপ করে (7·10) সমীকরণ থেকে $\Delta V$ নির্ণয় করা সম্ভব। যেহেতু ইলেকট্রনের দ্য ব্রয় তরঙ্গদৈর্ঘ্য হচ্ছে $\lambda = h/mv$, অতএব $\lambda \propto 1/v$ ; সুতরাং সমীকরণ (7·8) থেকে পাওয়া যায়

$$\mu = \frac{v_2}{v_1} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2} \qquad (7·11)$$

এখানে $\lambda_1$ এবং $\lambda_2$ হচ্ছে যথাক্রমে প্রথম এবং দ্বিতীয় মাধ্যমে ইলেকট্রনের দ্য ব্রয় তরঙ্গদৈর্ঘ্যের মান।

ইতিপূর্বে (7·3) অনুচ্ছেদে দেখা গেছে যে X-রশ্মির মত কেলাসের

চিত্র 7·6

কেলাসের অভ্যন্তর থেকে ইলেকট্রন ব্যবর্তন।

অভ্যন্তরে বিভিন্ন কেলাস তলগুচ্ছ থেকে প্রতিফলনের ফলে ইলেকট্রন ব্যবর্তন ঘটে। (7·6) চিত্রে একটি কেলাসের উপরিতলের অভিলম্বে আপতিত ইলেকট্রনগুচ্ছের এই প্রকার ব্যবর্তন দেখান হয়েছে। লম্বাভিমুখী আপতনের জন্য এক্ষেত্রে কেলাসের অভ্যন্তরে প্রবেশের সময় আপতিত ইলেকট্রনগুচ্ছের কোন প্রতিসরণ হয় না। যদি কেলাসের অভ্যন্তরে কেলাস তলগুচ্ছের উপর আপতন এবং প্রতিফলন কোণ $\theta$ হয়, তাহলে AB আপতিত রশ্মি এবং BC প্রতিফলিত রশ্মির অন্তর্গত কোণ $\phi = 2\theta$ হয়। কেলাস থেকে নির্গমন কালে কেলাসের উপরিতলের C বিন্দুতে অভিলম্বের সংগে $\phi'$ কোণে ইলেকট্রন-গুচ্ছটি CD অভিমুখে প্রতিসৃত হয়। কেলাসের অভ্যন্তরে ব্র্যাগ সমীকরণ লেখা যায় $n\lambda_2 = 2D \cos \theta$ ; এখানে $D = d \sin \theta$ হচ্ছে কেলাস তলগুচ্ছের পারস্পরিক ব্যবধান। $d$ হচ্ছে কেলাসের পরমাণুগুলির পারস্পরিক ব্যবধান। উপরের সমীকরণ দুটি থেকে পাওয়া যায়

$$n\lambda_2 = 2d \sin \theta \cos \theta = d \sin 2\theta = d \sin \phi \qquad (7·12)$$

যদি কেলাস থেকে নির্গমন কালে C বিন্দুতে ইলেকট্রনগুচ্ছের প্রতিসরণ না হত, তাহলে (7·12) সমীকরণটি কেলাস থেকে নির্গত ইলেকট্রনের ক্ষেত্রেও প্রয়োগ করা যেত এবং (7·12) ও (7·4) সমীকরণ দুটির মধ্যে কোন পার্থক্য থাকত না।

প্রকৃতপক্ষে যেহেতু C বিন্দুতে প্রতিসরণ হয়, অতএব (7·11) সমীকরণ থেকে আমরা লিখতে পারি ( 7·6 চিত্র দ্রষ্টব্য )

$$\mu = \frac{\lambda_1}{\lambda_2} = \frac{\sin\ \phi'}{\sin\ \phi}$$

সুতরাং (7·12) সমীকরণের সাহায্যে পাওয়া যায়

$$n\lambda_1 = n\lambda_2 \cdot \frac{\lambda_1}{\lambda_2} = d\ \sin\ \phi \cdot \frac{\sin\ \phi'}{\sin\ \phi} = d\ \sin\ \phi' \qquad (7·13)$$

এখানে $\lambda_1$ হচ্ছে কেলাসের বাইরে ইলেকট্রনের দ্য ব্রয় তরঙ্গদৈর্ঘ্য এবং $\phi'$ হচ্ছে আপতিত ও প্রতিফলিত রশ্মির অন্তর্গত কোণ। (7·13) সমীকরণ হচ্ছে সংশোধিত ব্যবর্তন সমীকরণ। ডেভিসন এবং গার্মারের প্রথম পরীক্ষায় এই সমীকরণ ব্যবহার করে তরঙ্গদৈর্ঘ্য নির্ণয় করা হয়।

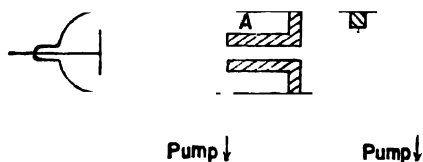
আবার X-রশ্মির ক্ষেত্রে প্রতিসরণের জন্য সংশোধিত (6·37) ব্র্যাগ সমীকরণের অনুরূপে ইলেকট্রন ব্যবর্তনের ক্ষেত্রে সংশোধিত ব্র্যাগ সমীকরণ লেখা যায় $n\lambda_1 = 2D\sqrt{\mu^2 - \sin^2\theta}$। ডেভিসন এবং গার্মারের দ্বিতীয় পরীক্ষায়, অর্থাৎ তির্যক আপতনের ক্ষেত্রে এই সংশোধিত ব্র্যাগ সমীকরণের সাহায্যে $\mu$ নির্ণয় করা যায়। এই নির্ণীত মান থেকে (7·10) সমীকরণের সাহায্যে $\Delta V$ নিরূপণ করা সম্ভব। নিকেলের অভ্যন্তরে এইভাবে নিরূপিত ইলেকট্রনের স্থিতিশক্তি পাওয়া যায় $\Delta U = e\Delta V = 21$ ই-ভো। ধাতুর অভ্যন্তরে ইলেকট্রনের স্থিতিশক্তির এই প্রকার উচ্চ মান ধাতুর আধুনিক ইলেকট্রন তত্ত্ব অনুযায়ী আশা করা যায়।

নিম্নশক্তি ইলেকট্রনের ক্ষেত্রে প্রতিসরাংক $\mu > 1$ হয়। ইলেকট্রনের শক্তি বৃদ্ধি পেলে $\mu = 1$ হয়ে যায়। (7·10) সমীকরণ অনুযায়ী এই রকমই হওয়া উচিত।

### 7·5 : জি. পি. টমসনের পরীক্ষা

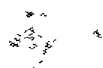
ডেভিসন এবং গার্মার 30 থেকে 600 ই-ভো পর্যন্ত শক্তি সম্পন্ন অপেক্ষাকৃত মন্থরগতি ইলেকট্রন ব্যবহার করে ইলেকট্রনের তরঙ্গসত্তার অস্তিত্ব

আবিষ্কার করেন। এর অব্যবহিত পরে টমসন (G. P. Thomson) নামক বৃটিশ বিজ্ঞানী ১৯২৮ সালে 10,000 থেকে 50,000 ই-ভো শক্তি সম্পন্ন দ্রুতগতি ইলেকট্রন ব্যবর্তন পরীক্ষা অনুষ্ঠিত করেন।

টমসনের পরীক্ষা প্রণালী (7·7) চিত্রে দেখান হয়েছে। C একটি আবদ্ধ

চিত্র 7·7

জি. পি. টমসন কর্তৃক অনুষ্ঠিত ইলেকট্রন ব্যবর্তন পরীক্ষা।

নল, যা পাম্পের সাহায্যে খুব নিম্ন বায়ুচাপে রাখা হয়। নলটির এক প্রান্তে তড়িৎ মোক্ষণ প্রক্রিয়ার সাহায্যে ক্যাথোড রশ্মি উৎপন্ন করার ব্যবস্থা থাকে। সেগুলিকে প্রায় 50,000 ভোল্ট পর্যন্ত বিভব প্রভেদ দ্বারা আকৃষ্ট করে A অ্যানোডের গায়ে খুব সূক্ষ্ম ছিদ্রের মধ্য দিয়ে পার করিয়ে সমান্তরিত করা হয়। এই সমান্তরিত ইলেকট্রনগুচ্ছ একটি খুব পাতলা সোনার পাতের উপর লম্বভাবে আপতিত হয়। F সোনার পাতের বেধ মাত্র $10^{-6}$ সেমির মত হয়। পাতের ভিতর দিয়ে নির্গত ইলেকট্রনগুলি P ফোটোগ্রাফিক প্লেটের উপর আপতিত হয়। ফোটোগ্রাফিক প্লেটটি বিকসিত করলে যে নক্শা দেখতে পাওয়া যায় তার নিদর্শন (7·8) চিত্রে দেখান হয়েছে। এই নকশার কেন্দ্রভাগে একটি কৃষ্ণ বিন্দু দেখা যায়; এটিকে ঘিরে কয়েকটি সমকেন্দ্রিক চক্রাকার কৃষ্ণ রেখা দেখা যায়। এইরূপ নক্শা ডিবাই-শেরার (Debye Scherrer) পদ্ধতিতে চূর্ণ কেলাস থেকে ব্যবর্তিত X-রশ্মি কর্তৃক উৎপন্ন নক্শার অনুরূপ ( 6·16 অনুচ্ছেদ দ্রষ্টব্য )।

ধাতুর মধ্যে সাধারণতঃ অতি ক্ষুদ্র ধাতব কেলাসগুলি যদৃচ্ছ বিন্যস্ত থাকে, ঠিক যেমন থাকে খুব সূক্ষ্মভাবে চূর্ণীকৃত কেলাসের মধ্যে। আপতিত ইলেকট্রনগুলি যদি তরঙ্গের ন্যায় আচরণ করে, তাহলে তারা ব্র্যাগ সমীকরণ দ্বারা নির্ধারিত বিশেষ বিশেষ দিকে ব্যবর্তন চূড়া উৎপন্ন করবে। এখন যদি আপতিত ইলেকট্রনগুলিকে অক্ষ করে ব্যবর্তন কোণের সমান অর্ধশীর্ষ কোণ সম্পন্ন একটি শংকু কল্পনা করা যায় তাহলে উক্ত নির্দিষ্ট কোণে ব্যবর্তিত

চিত্র 7·8

ইলেকট্রন ব্যবর্তন নকশার আলোকচিত্র।

ইলেকট্রনগুলি এই শংকুর বক্রতল ঘেঁষে বিভিন্ন দিকে অগ্রসর হবে। ফোটোগ্রাফিক প্লেটকে এই শংকু যেখানে ছেদ করে স্পষ্টতঃ সেখানে একটি কৃষ্ণ চক্রের সৃষ্টি হয়।

এই চক্রগুলি যে সোনার পাতের উপরে আপতিত ইলেকট্রনের সংঘাতের ফলে নিঃসৃত X-রশ্মির ব্যবর্তনের জন্য উৎপন্ন হয় না, তা প্রমাণ করার জন্য টমসন মোক্ষণ নলের কাছে একটি চুম্বক ধরে দেখান যে চুম্বকের প্রভাবে ইলেকট্রনগুলি বিচ্যুত হয়ে গেলে ব্যবর্তন নক্শা আর দেখা যায় না।

চক্রগুলির ব্যাসার্ধ পরিমাপ করে ব্যবর্তন কোণ মাপা যায়। এর থেকে ব্র্যাগ সমীকরণের সাহায্যে ইলেকট্রনের দ্য ব্রয় তরঙ্গদৈর্ঘ্য $\lambda$ নির্ণয় করা যায়। এইভাবে নির্ণীত তরঙ্গদৈর্ঘ্যের মান এবং দ্য ব্রয় সমীকরণ থেকে নির্ণীত মানের মধ্যে ভাল সংগতি পাওয়া যায়। এখানে উল্লেখযোগ্য যে যেহেতু এই পরীক্ষায় দ্রুতগতি ইলেকট্রন ব্যবহার করা হয়, সেজন্য এক্ষেত্রে দ্য ব্রয় তরঙ্গদৈর্ঘ্যের ফর্মুলাটিকে আপেক্ষিকতাবাদের ক্রিয়া বিবেচনা করে সংশোধিত করতে হবে। আপেক্ষিকতাবাদ অনুযায়ী (8·10 অনুচ্ছেদ দ্রষ্টব্য), যদি ইলেকট্রনের স্থির-ভর $m_0$ হয়, $v$ বেগে ভ্রাম্যমাণ অবস্থায় এর ভর $m$ হয় এবং $\beta = v/c$ হয়, তাহলে এর ভরবেগ হয়

$$p = mv = \frac{m_0 v}{\sqrt{1-\beta^2}}$$

এখানে $c$ হচ্ছে শূন্যে আলোকের বেগ। ইলেকট্রনটির গতিশক্তি হচ্ছে

$$E = eV = \frac{m_0 c^2}{\sqrt{1-\beta^2}} - m_0 c^2$$

এর থেকে পাওয়া যায়

$$\sqrt{1-\beta^2} = \frac{m_0 c^2}{m_0 c^2 + eV} = \frac{1}{1 + eV/m_0 c^2}$$

যেহেতু $eV << m_0 c^2$, অতএব লেখা যায়

$$\sqrt{1-\beta^2} = 1 - eV/m_0 c^2 \quad \text{এবং} \quad 1-\beta^2 = 1 - \frac{2eV}{m_0 c^2}$$

সুতরাং $\beta^2 = 2eV/m_0 c^2$ এবং $v = \sqrt{2eV/m_0}$ ; অতএব আমরা পাই

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h\sqrt{1-\beta^2}}{m_0 v} = \frac{h(1 - eV/m_0 c^2)}{\sqrt{2m_0 eV}} \qquad (7·14)$$

(7·14) সমীকরণ হচ্ছে দ্য ব্রয় তরঙ্গদৈর্ঘ্যের আপেক্ষিকতাবাদ জনিত সংশোধিত সমীকরণ ( সমীকরণ 7·5 দ্রষ্টব্য )।

টমসন (7·14) সমীকরণ থেকে ইলেকট্রনের দ্য ব্রয় তরঙ্গদৈর্ঘ্য $\lambda$ নির্ণয় করে ব্র্যাগ সমীকরণের সাহায্যে বিভিন্ন ধাতব কেলাসের জাফরি (Lattice) ব্যবধান নির্ণয় করেন। X-রশ্মির সাহায্যে নির্ণীত মানের সংগে এই ভাবে নির্ণীত জাফরি ব্যবধানের বেশ ভাল সংগতি পাওয়া যায়। উদাহরণস্বরূপ, সোনার ক্ষেত্রে ইলেকট্রন ব্যবর্তন থেকে পাওয়া যায় $d = 4·18$ অ্যাং আর X-রশ্মি ব্যবর্তন থেকে পাওয়া যায় $d = 4·06$ অ্যাং।

বর্তমানে ইলেকট্রন ব্যবর্তন পদ্ধতি কেলাসের গঠন নির্ণয় করার কাজে বিস্তৃত ভাবে ব্যবহার করা হয়। তাছাড়া কেলাসের উপরিতল থেকে ইলেকট্রন প্রতিফলিত করেও ব্যবর্তন নক্‌শা উৎপন্ন করা হয়। এই নক্‌শার মধ্যেও কতকগুলি সমকেন্দ্রিক চক্র দেখা যায়। এইভাবে উৎপন্ন নক্‌শা বিশ্লেষণ করে কেলাসের উপরিতলের গঠন এবং আস্তরণের (Film) প্রকৃতি নির্ণয় করা যায়।

ইলেকট্রন ছাড়া অন্যান্য বস্তু কণিকা, যথা প্রোটন, নিউট্রন প্রভৃতির ক্ষেত্রেও কণিকাগুলির তরঙ্গসত্তা আবিষ্কৃত হয়েছে। এমন কী বিভিন্ন পরমাণু এবং অণুর তরঙ্গসত্তার অস্তিত্বও পরীক্ষা দ্বারা প্রমাণিত হয়েছে। এর মধ্যে নিউট্রন তরঙ্গের ব্যবহারিক প্রয়োগ দ্বারা কেলাসের গঠন নির্ণয়ের কাজ খুব সুবিধাজনক। নিউট্রন একটি আধানহীন কণিকা। সুতরাং ব্যবর্তন করার সময় এরা পরমাণু মধ্যস্থ আহিত কণিকাগুলির ( অর্থাৎ কেন্দ্রক এবং ইলেকট্রনগুলির ) তড়িৎক্ষেত্র দ্বারা প্রভাবিত হয় না। নিউট্রনের ভর ইলেকট্রন অপেক্ষা অনেক বেশী হওয়ায় সমশক্তি নিউট্রনের দ্য ব্রয় তরঙ্গদৈর্ঘ্য অপেক্ষাকৃত অনেক ক্ষুদ্র হয়। স্বাভাবিক বায়ুমণ্ডলীয় উষ্ণতায় তাপীয় শক্তি ($kT$) সম্পন্ন নিউট্রনের তরঙ্গদৈর্ঘ্য প্রায় 1·8 অ্যাং হয়, যা X-রশ্মির তরঙ্গদৈর্ঘ্যের সংগে তুলনীয়। সেইজন্য X-রশ্মি ব্যবর্তনের জন্য উদ্ভাবিত পরীক্ষা প্রণালী প্রয়োগ করে নিউট্রন ব্যবর্তন পরীক্ষা অনুষ্ঠিত করা যায়। লক্ষণীয় যে সমশক্তি সম্পন্ন ইলেকট্রনের তরঙ্গদৈর্ঘ্য প্রায় 77 অ্যাং হয়।

### 7·6 : পদার্থের তরঙ্গসত্তা সম্বন্ধীয় দ্য ব্রয় তত্ত্ব

আলোক এবং পদার্থের দ্বৈত সত্তার মধ্যে সামঞ্জস্য বিধান করতে গেলে তরঙ্গ এবং কণিকা বলতে কী বোঝায় তা ভালভাবে বিশ্লেষণ করতে হবে।

কণিকার মৌলিক বৈশিষ্ট্য হচ্ছে যে এটি একটি বিন্দুমাত্রা বিশিষ্ট সত্তা, যা প্রতি মুহূর্তে একটা নির্দিষ্ট অবস্থানে থাকে এবং যার একটা নির্দিষ্ট ভরবেগ $p$ এবং নির্দিষ্ট শক্তি $E$ থাকে। অপরপক্ষে নির্দিষ্ট তরঙ্গদৈর্ঘ্য ($\lambda$) এবং কম্পাংক ($\nu$) বিশিষ্ট তরঙ্গের মৌলিক বৈশিষ্ট্য হচ্ছে যে এর বিস্তৃতি অসীম দূরত্ব পর্যন্ত এবং অস্তিত্ব অনন্তকাল ব্যাপী। স্পষ্টতঃ কণিকাসত্তার এবং তরঙ্গসত্তার মৌলিক বৈশিষ্ট্যগুলি সম্পূর্ণ পরস্পর বিরোধী। কী ভাবে এই পরস্পর বিরোধী সত্তাগুলির মধ্যে সামঞ্জস্য বিধান করা সম্ভব তা পরে আলোচিত হবে।

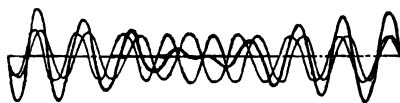
প্রথমতঃ বিচার করে দেখা যাক যে কণিকার বেগ এবং কণিকা সংশ্লিষ্ট তরঙ্গের বেগের মধ্যে কোন সম্পর্ক আছে কি না। তরঙ্গ তত্ত্ব থেকে জানা আছে যে তরঙ্গের দুই প্রকার বেগ আছে—একটি এর 'দশা-বেগ' (Phase Velocity) বা 'তরঙ্গ-বেগ' (Wave Velocity), অন্যটি এর 'গুচ্ছ-বেগ' (Group Velocity)। এই দুটি বেগের মধ্যে একটা নির্দিষ্ট সম্পর্ক আছে। নির্দিষ্ট তরঙ্গদৈর্ঘ্য সম্পন্ন তরঙ্গ কোন নির্দিষ্ট মাধ্যমে ঋণাত্মক অসীম ($-\infty$) থেকে ধনাত্মক অসীম ($+\infty$) পর্যন্ত বিস্তৃত হয়। তরঙ্গটির বিস্তার (Amplitude) সর্বত্র সমান হয়। তরঙ্গের যে কোন একটি নির্দিষ্ট অবস্থা বা দশা, যথা এর শীর্ষ (Crest) অথবা পাদ (Trough) যে বেগে এক বিন্দু থেকে অন্য বিন্দুতে সঞ্চারিত হয় তা হ'ল এর 'তরঙ্গ-বেগ' বা 'দশা-বেগ' ($u$)। যদি $\lambda$ হয় তরঙ্গদৈর্ঘ্য এবং $\nu$ হয় কম্পাংক, তাহলে আমরা জানি যে

$$u = \nu\lambda = \nu/\tau \tag{7·15}$$

এখানে $\tau = 1/\lambda$ হচ্ছে তরঙ্গ-সংখ্যা (Wave Number)। বিচ্ছুরক (Dispersive) মাধ্যমে বিভিন্ন তরঙ্গদৈর্ঘ্য সম্পন্ন তরঙ্গের তরঙ্গ-বেগ পৃথক হয়।

একটি একবর্ণী তরঙ্গের বিভিন্ন শীর্ষ বা পাদগুলির আকৃতি অভিন্ন। একটি থেকে অন্যটি পৃথক বলে বোঝা সম্ভব নয়। অপরপক্ষে তরঙ্গের বেগ মাপতে হলে একটি নির্দিষ্ট শীর্ষ বা পাদের উপর দৃষ্টি নিবদ্ধ রেখে সেটি নির্দিষ্ট সময়ে কতদূর সঞ্চারিত হয় তা পরিমাপ করার দরকার। অর্থাৎ তরঙ্গশীর্ষ বা তরঙ্গপাদটিকে চিহ্নিত করতে হয়। দেখা যাক কী ভাবে তা সম্ভব। শব্দ তত্ত্ব থেকে জানা আছে যে কম্পাংক বা তরঙ্গদৈর্ঘ্যের মধ্যে অল্প পার্থক্য সম্পন্ন দুটি তরঙ্গ পরস্পরের উপর অধ্যারোপিত (Superpose)

করলে লব্ধি (Resultant) তরঙ্গটির মধ্যে কোন কোন স্থানে বিস্তার (Amplitude) খুব বেড়ে যায়, কোন কোন স্থানে খুব কমে যায়। এইরূপ সংঘটনের নিদর্শন হচ্ছে স্বরকম্পের (Beats) উৎপাদন। লব্ধি তরঙ্গের বৃহত্তম বিস্তার যে বেগে সঞ্চারিত হয় তাকে বলা হয় তরঙ্গের 'গুচ্ছ-বেগ'। বস্তুতঃ তরঙ্গ নিহিত শক্তি এই গুচ্ছ-বেগেই সঞ্চারিত হয়।

মনে করা যাক যে $\nu$ এবং $\nu'$ কম্পাংক সম্পন্ন দুটি তরঙ্গ পরস্পরের উপর অধ্যারোপিত হয় ( 7·9 চিত্র দ্রষ্টব্য )। তরঙ্গ দুটির তরঙ্গদৈর্ঘ্য

চিত্র 7·9

দুটি বিভিন্ন কম্পাংক সম্পন্ন তরঙ্গের অধ্যারোপণের ফলে স্বরকম্প উৎপাদন।

$\lambda$ এবং $\lambda'$ ধরা যাক। যদি তরঙ্গ দুটি $x$-দিকে সঞ্চারিত হয়, তাহলে তাদের সমীকরণ লেখা যেতে পারে

$$y = a \sin 2\pi(\nu t - x/\lambda) = a \sin 2\pi(\nu t - \tau x)$$
$$y' = a \sin 2\pi(\nu' t - x/\lambda') = a \sin 2\pi(\nu' t - \tau' x)$$

সুতরাং লব্ধি তরঙ্গ হবে

$$Y(x,t) = y + y' = a \sin 2\pi(\nu t - \tau x) + a \sin 2\pi(\nu' t - \tau' x)$$
$$= 2a \cos 2\pi \left(\frac{\nu - \nu'}{2} t - \frac{\tau - \tau'}{2} x\right) \sin 2\pi \left(\frac{\nu + \nu'}{2} t - \frac{\tau + \tau'}{2} x\right) \quad (7·16)$$

সমীকরণ (7·16) থেকে দেখা যায় যে লব্ধি তরঙ্গটির কম্পাংক এবং তরঙ্গ-সংখ্যা যথাক্রমে $(\nu + \nu')/2$ এবং $(\tau + \tau')/2$ হয়। এর বিস্তার (Amplitude) ধ্রুবক নয়; কোসাইন পদটির উপর নির্ভরশীল। অর্থাৎ বিস্তার মন্থর হারে পরিবর্তিত হয়। তরঙ্গটির দশা (Phase) সঞ্চারিত হয় $(\nu + \nu')/(\tau + \tau')$ বেগে। অপরপক্ষে এর বৃহত্তম বিস্তার সঞ্চারিত হয়

$(\nu-\nu')/(\tau-\tau')$ বেগে। যখন $\nu$ এবং $\nu'$ পরস্পরের প্রায় সমান হয়, তখন দশা-বেগের মান হয় ( সমীকরণ 7·15 দ্রষ্টব্য )

$$u=\lim_{\nu'\to\nu}\frac{\nu+\nu'}{\tau+\tau'}=\frac{\nu}{\tau}=\nu\lambda$$

অপরপক্ষে গুচ্ছ-বেগের মান হয়

$$w=\lim_{\nu'\to\nu}\frac{\nu-\nu'}{\tau-\tau'}=\frac{d\nu}{d\tau} \tag{7·17}$$

গুচ্ছ-বেগের এই গাণিতিক অভিব্যক্তি ( সমীকরণ 7·17 ) সম্পূর্ণ সাধারণ ভাবে প্রমাণ করা যায়। উপরে অবশ্য এটি একটি বিশেষ ক্ষেত্রে, অর্থাৎ দুটি মাত্র তরঙ্গের ক্ষেত্রে, প্রতিপন্ন করা হয়েছে।

এখানে উল্লেখযোগ্য যে যত বেশী সংখ্যক বিভিন্ন কম্পাংকের তরঙ্গ পরস্পরের উপর অধ্যারোপিত করা যায়, লব্ধি তরঙ্গটির আকৃতি তত পরিবর্তিত হতে থাকে। অধ্যারোপিত তরঙ্গের সংখ্যা বৃদ্ধি পেলে লব্ধি তরঙ্গের বিক্ষোভগুলি (Disturbances) খুব সংকীর্ণ অঞ্চলে সীমাবদ্ধ থাকে ; পরপর এইরূপ দুটি অঞ্চলের মধ্যবর্তী স্থানে প্রায় কোন বিক্ষোভ থাকে না। এইভাবে সংকীর্ণ অঞ্চলে সীমাবদ্ধ ঘন সন্নিবিষ্ট বিক্ষোভগুলিকে 'তরঙ্গ-পুলিন্দা' (Wave Packets) বলা যায়। অধ্যারোপিত তরঙ্গগুলির তরঙ্গদৈর্ঘ্যের পাল্লা যত বেশী বিস্তৃত হয়, তরঙ্গ-পুলিন্দার আঞ্চলিক সীমা তত সংকীর্ণ হয়। অবশেষে তরঙ্গদৈর্ঘ্যের পাল্লার বিস্তৃতি যদি অসীম হয়, তাহলে পুলিন্দাটি একটি বিন্দুতে পর্যবসিত হয়।

সমীকরণ (7·15) থেকে পাওয়া

$$\frac{\partial u}{\partial \tau}=\frac{1}{\tau}\frac{\partial \nu}{\partial \tau}-\frac{\nu}{\tau^2}=\frac{w-u}{\tau}$$

সুতরাং আমরা পাই

$$w=u+\tau\frac{\partial u}{\partial \tau}=u-\lambda\frac{\partial u}{\partial \lambda} \tag{7·18}$$

এখন দ্য ব্রয় তত্ত্ব অনুসারে যদি কণিকা সংশ্লিষ্ট তরঙ্গের তরঙ্গদৈর্ঘ্য এবং কম্পাংক হয় যথাক্রমে $\lambda$ এবং $\nu$ তাহলে $p=h/\lambda=h\tau$ এবং $E=h\nu$ লেখা যায়।

সুতরাং $v$ বেগে ভ্রাম্যমাণ কণিকার মোট শক্তি এবং ভরবেগ হয় যথাক্রমে ( সমীকরণ 8·26 ও 8·28 দ্রষ্টব্য )

$$E = h\nu = mc^2 = \frac{m_0 c^2}{\sqrt{1-\beta^2}} \tag{7·19}$$

$$p = h\tau = mv = \frac{m_0 \beta c}{\sqrt{1-\beta^2}} \tag{7·20}$$

সুতরাং আমরা পাই

$$E/p = \nu/\tau = \nu\lambda = \frac{c}{\beta}$$

অর্থাৎ কণিকা সংশ্লিষ্ট তরঙ্গের দশা-বেগ হয়

$$u = \nu\lambda = \frac{c}{\beta} \tag{7·21}$$

যেহেতু আপেক্ষিকতাবাদ অনুযায়ী কণিকার বেগ $v$ সব সময়েই $c$ অপেক্ষা কম হয়, অতএব কণিকা সংশ্লিষ্ট তরঙ্গের দশা-বেগ ($u$) সব সময় $c$ অপেক্ষা বেশী হয়। এই সিদ্ধান্ত বিশেষ আপেক্ষিতাবাদের পরিপন্থী নয়। কারণ যে কোন তরঙ্গবাহিত সংকেত (Signal) গুচ্ছ-বেগ সহকারে পরিভ্রমণ করে, যা সর্বদা $c$ অপেক্ষা কম হয়।

আবার সমীকরণ (7·19) এবং (7·20) থেকে পাওয়া যায়

$$h\frac{d\nu}{d\beta} = \frac{m_0 c^2 \beta}{(1-\beta^2)^{3/2}} \quad \text{এবং} \quad h\frac{d\tau}{d\beta} = \frac{m_0 c}{(1-\beta^2)^{3/2}}$$

অতএব আমরা পাই

$$w = \frac{d\nu}{d\tau} = \frac{d\nu/d\beta}{d\tau/d\beta} = c\beta = v \tag{7·22}$$

অর্থাৎ কণিকা তরঙ্গের গুচ্ছ-বেগ $w$ হচ্ছে কণিকার বেগ $v$-এর সমান। এখানে উল্লেখযোগ্য যে পদার্থ তরঙ্গ যখন এক মাধ্যম থেকে অন্য মাধ্যমে প্রতিসৃত হয় তখন প্রতিসরাংকের যে অভিব্যক্তি (Expression) পাওয়া যায় ( 7·8 সমীকরণ দ্রষ্টব্য ), তাতে যদি কণিকা বেগের পরিবর্তে সমীকরণ (7·21) দ্বারা নির্ধারিত দশা-বেগ (Phase Velocity) বসান যায়, তাহলে উক্ত অভিব্যক্তিটি আলোক তরঙ্গের প্রতিসরাংকের অভিব্যক্তি থেকে অভিন্ন হয়।

## 7·7 : হাইসেনবার্গের অনিশ্চয়তাবাদ

সমীকরণ (7·22) থেকে সিদ্ধান্ত করা যেতে পারে যে একটি বস্তুকণিকা হচ্ছে যেন কতকগুলি বিভিন্ন তরঙ্গদৈর্ঘ্য সম্পন্ন তরঙ্গের অধ্যারোপণের (Superposition) ফলে উৎপন্ন একটি তরঙ্গ-পুলিন্দা (Wave Packet)। এইরূপ তরঙ্গ-পুলিন্দার একটি রৈখিক বিস্তৃতি ($\Delta x$) থাকে। সেইজন্য অনুমান করা যায় যে কণিকাটি এই বিস্তৃতির মধ্যে যে কোন বিন্দুতে অবস্থিত থাকতে পারে। কাজেই নিশ্চিতভাবে বলা সম্ভব নয় যে কণিকাটি তরঙ্গ-পুলিন্দার বিস্তৃতির ঠিক কোন বিন্দুতে অবস্থিত থাকে। আবার যেহেতু কতকগুলি বিভিন্ন তরঙ্গদৈর্ঘ্য সম্পন্ন তরঙ্গের অধ্যারোপণের ফলে তরঙ্গ-পুলিন্দাটির সৃষ্টি হয়, অতএব পুলিন্দাটির তরঙ্গদৈর্ঘ্য কী তাও নিশ্চিতভাবে বলা সম্ভব নয়। কেবল এইটুকু বলা সম্ভব যে পুলিন্দাটির তরঙ্গদৈর্ঘ্য একটি নির্দিষ্ট পাল্লার ($\Delta\lambda$) মধ্যে নিবদ্ধ থাকে। যেহেতু কণিকাটির ভরবেগ $p = h\lambda$, অতএব উপরের আলোচনা থেকে প্রতীয়মান হয় যে কণিকাটির ভরবেগ $p$ একটি বিশেষ পাল্লার ($\Delta p$) মধ্যে সীমিত থাকে। অর্থাৎ কণিকাটির ভরবেগের মান নিশ্চিতভাবে বলা সম্ভব নয়। সুতরাং দেখা যাচ্ছে যে বস্তুর তরঙ্গস্বরূপ মেনে নিলে কোন বস্তুকণিকার অবস্থানের মধ্যে কিছুটা অনিশ্চয়তা $\Delta x$ এসে যায়; তাছাড়া কণিকাটির ভরবেগের মধ্যেও কিছুটা অনিশ্চয়তা $\Delta p$ এসে যায়। পূর্ব অনুচ্ছেদে দেখা গেছে যে অধ্যারোপিত তরঙ্গের সংখ্যা যত বেশী হয় এবং তাদের তরঙ্গদৈর্ঘ্যের পাল্লা যত বেশী বিস্তৃত হয়, তরঙ্গ-পুলিন্দার রৈখিক বিস্তৃতি ( অর্থাৎ কণিকাটির অবস্থানের অনিশ্চয়তা ) $\Delta x$ তত কম হয়। কিন্তু সংগে সংগে তরঙ্গদৈর্ঘ্যের পাল্লার বিস্তৃতি এবং এই বিস্তৃতির উপর নির্ভরশীল কণিকাটির ভরবেগের অনিশ্চয়তা $\Delta p$ বাড়তে থাকে। অবশেষে যখন তরঙ্গদৈর্ঘ্যের পাল্লা $\Delta\lambda$ অসীম হয়, অর্থাৎ কণিকাটির ভরবেগ সম্পূর্ণ অনিশ্চিত ($\Delta p = \infty$) হয়, তখন তরঙ্গ-পুলিন্দাটি একটি বিন্দুতে পর্যবসিত হয়। অর্থাৎ কণিকাটির অবস্থানে তখন আর কোন অনিশ্চয়তা থাকে না ($\Delta x = 0$)। তখন নিশ্চিতভাবে বলা সম্ভব যে কণিকাটি কোন বিন্দুতে অবস্থিত থাকে।

অপরপক্ষে একটি নির্দিষ্ট তরঙ্গদৈর্ঘ্য সম্পন্ন তরঙ্গের ক্ষেত্রে $\Delta\lambda = 0$ হয়। সুতরাং এক্ষেত্রে কণিকাটির ভরবেগের কোন অনিশ্চয়তা থাকে না ($\Delta p = 0$); অর্থাৎ ভরবেগ নিশ্চিতভাবে জানা সম্ভব। কিন্তু কণিকাটির অবস্থানের

অনিশ্চয়তা এখন অসীম ($\Delta x = \infty$), কারণ কণিকা সংশ্লিষ্ট তরঙ্গটি এখন অসীম দূরত্ব পর্যন্ত বিস্তৃত হয়।

সুতরাং উপরের আলোচনা থেকে দেখা যায় যে বস্তুর তরঙ্গস্বরূপ মেনে নিলে একটি বস্তু কণিকার অবস্থান ($x$) এবং ভরবেগ ($p$) দুটিই অনিশ্চিত হয়ে যায়। একই সময়ে পরিমিত এই দুটি সংখ্যার অনিশ্চয়তার মান $\Delta x$ এবং $\Delta p$ এমন হয় যে, একটি বৃদ্ধি পেলে অপরটি হ্রাস পায়। অর্থাৎ $\Delta x \propto 1/\Delta p$ হয়। সুতরাং আমরা লিখতে পারি

$$\Delta x \,.\, \Delta p = \text{ধ্রুবক}$$

প্রখ্যাত জার্মান বিজ্ঞানী হাইসেনবার্গ (Heisenberg) সর্বপ্রথম এই মতবাদ উদ্ভাবিত করেন। তিনি দেখান যে $\Delta x$ এবং $\Delta p$ সংখ্যা দুটির গুণফলের ন্যূনতম মান প্ল্যাংক ধ্রুবক $h$-এর সমান হয়ঃ

$$\Delta x . \Delta p \geq h \qquad (7{\cdot}23)$$

অর্থাৎ কোন কণিকার অবস্থান পরিমাপের অনিশ্চয়তা ($\Delta x$) এবং তার ভর-বেগের সমকালীন অনিশ্চয়তার ($\Delta p$) গুণফল প্ল্যাংক ধ্রুবক $h$-এর সমান অথবা $h$ অপেক্ষা বেশী হয়।

উপরে প্রদত্ত (7·23) সম্পর্কটিকে বলা হয় হাইসেনবার্গের 'অনিশ্চয়তা সম্পর্ক' (Uncertainty Relation)। হাইসেনবার্গের এই মতবাদকে 'অনিশ্চয়তা মতবাদ' (Uncertainty Principle) বলা হয়। উপরের আলোচনা থেকে দেখা যায় যে এই মতবাদের সাহায্যে বস্তু কণিকার ( এবং আলোকের ) দ্বৈত সত্তার (Dual Nature) মধ্যে সামঞ্জস্য বিধান করা সম্ভবপর।

এখন প্রশ্ন হতে পারে যে অবস্থান এবং ভরবেগের উপরোক্ত অনিশ্চয়তা কী পরিমাপ পদ্ধতির কোন ত্রুটির জন্য ঘটে, না এই অনিশ্চয়তার আর কোন মৌলিক কারণ আছে। হাইসেনবার্গের মতে এই অনিশ্চয়তা প্রকৃতির একটা মৌলিক ধর্ম। যত সূক্ষ্ম পরিমাপ পদ্ধতিই উদ্ভাবিত করা যাক না কেন, এই অনিশ্চয়তার হাত থেকে নিস্তার নেই। একথা সুবিদিত যে সব রকম পরিমাপের ক্ষেত্রেই পরিমিত রাশির মান পরিমাপ পদ্ধতির প্রভাবে কিছুটা পরিবর্তিত হয়ে যায়। যখন কোন তড়িৎ বর্তনীতে অ্যাম্মিটার (Ammeter) সংযুক্ত করে তড়িৎ প্রবাহ পরিমাপ করা হয়, তখন অ্যাম্মিটারের কুণ্ডলীর রোধের জন্য পরিমিত প্রবাহমাত্রা প্রকৃত মাত্রা ( অর্থাৎ

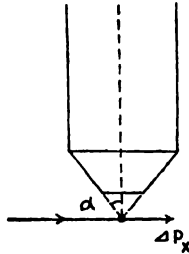
অ্যাম্‌মিটার সংযুক্ত করার আগেকার মাত্রা ) অপেক্ষা কিছু কমে যায়। এক্ষেত্রে অবশ্য অ্যাম্‌মিটার কুণ্ডলীর রোধ জানা থাকলে পরিমাপের এই ত্রুটি সংশোধন করা সম্ভব। আণবিক ও পরমাণবিক মাপের কোন বস্তু কণিকার ( বা আলোক কণিকার ) অবস্থান ( বা ভরবেগ ) নির্ণয়ের সময় পরিমাপ পদ্ধতির প্রভাবে কণিকাটির অবস্থান ( বা ভরবেগ ) কিছু পরিবর্তিত হয়। হাইসেনবার্গের মতানুযায়ী এই পরিবর্তন জনিত ত্রুটি সংশোধন করা সম্ভব নয় এবং এই পরিবর্তনই উক্ত পরিমাপের অনিশ্চয়তার কারণ। পরবর্তী অনুচ্ছেদে প্রদত্ত উদাহরণ দ্বারা এই তথ্য আরও ভালভাবে বোঝা যেতে পারে।

## 7·8 : গামা রশ্মি অণুবীক্ষণ পরীক্ষা

মনে করা যাক যে আমরা একটি ইলেকট্রনের অবস্থান নির্ণয় করতে চাই। এর জন্য একটি অতি উচ্চ বিশ্লেষণ ক্ষমতা সম্পন্ন অণুবীক্ষণ ব্যবহার করে নিম্নে বর্ণিত কাল্পনিক পরীক্ষাটি অনুষ্ঠিত করা যেতে পারে। একথা সুবিদিত যে দুটি বিন্দুর মধ্যেকার ন্যূনতম দূরত্ব $\Delta x$ যদি এমন হয় যে বিন্দু দুটিকে অণুবীক্ষণ দ্বারা পর্যবেক্ষণ করলে পৃথক বলে বোঝা যায়, তাহলে $\Delta x$ সংখ্যাটিকে বলা যায় অণুবীক্ষণের বিশ্লেষণ ক্ষমতা (Resolving Power)। $\Delta x$ যত ছোট হয়, অণুবীক্ষণের বিশ্লেষণ ক্ষমতা তত উচ্চ হয়। আলোক তত্ত্ব থেকে জানা আছে যে

$$\Delta x = \frac{\lambda}{\sin \alpha} \tag{7·24}$$

এখানে $\alpha$ হচ্ছে আলোকিত বস্তু থেকে অণুবীক্ষণের অভিলক্ষ্য (Objective) লেন্‌সের মধ্যে প্রবেশকারী আলোক-শংকুর অধশীর্ষ কোণ (Semi Vertical Angle) এবং $\lambda$ হচ্ছে উক্ত আলোকের তরঙ্গদৈর্ঘ্য। স্পষ্টতঃ ইলেকট্রনের অবস্থানের অনিশ্চয়তা হচ্ছে $\Delta x$ সংখ্যাটির সমান। এই অনিশ্চয়তা কমাতে হলে $\Delta x$ সংখ্যাটিকে কমান প্রয়োজন। ব্যবহৃত আলোকের তরঙ্গদৈর্ঘ্য কমিয়েই এটা করা সম্ভব। প্রকৃতিতে সর্বাপেক্ষা কম তরঙ্গদৈর্ঘ্য সম্পন্ন যে আলোক পাওয়া যায় তা হচ্ছে পরমাণু কেন্দ্রক থেকে নিঃসৃত $\gamma$-রশ্মি। সুতরাং $\gamma$-রশ্মি ব্যবহার করলে ইলেকট্রনটির অবস্থান নির্ণয়ের অনিশ্চয়তা ন্যূনতম করা সম্ভব। উল্লেখযোগ্য যে কোন বাস্তব অণুবীক্ষণ দ্বারা $\gamma$-রশ্মি ব্যবহার করে কোন বস্তু কণিকা নিরীক্ষণ করা সম্ভব নয়। কারণ অণুবীক্ষণে ব্যবহৃত লেন্‌স্ ইত্যাদির সাহায্যে $\gamma$-রশ্মিকে প্রতিসৃত করা যায় না। সেইজন্য এই পরীক্ষাটি বস্তুতঃ একটি কাল্পনিক পরীক্ষা। তা সত্ত্বেও ধরা যাক যে এইরূপ একটি পরীক্ষা

করা সম্ভব। ইলেকট্রনের উপর আপতিত $\gamma$-ফোটন কম্পটন বিক্ষেপের ফলে যদি অণুবীক্ষণের মধ্যে প্রবেশ করে, তাহলে ইলেকট্রনটির অবস্থান নির্ণয় করা সম্ভব হতে পারে ( 7·10 চিত্র দ্রষ্টব্য )। অবশ্য অণুবীক্ষণের বিশ্লেষণ

চিত্র 7·10

$\gamma$-রশ্মি অণুবীক্ষণ।

ক্ষমতা সীমিত হওয়ার জন্য এইভাবে নির্ণীত অবস্থানের কিছুটা অনিশ্চয়তা ($\Delta x$) থাকবে যা সমীকরণ (7·24) দ্বারা নির্ধারিত হয়।

অপরপক্ষে একটি $\nu$ কম্পাংক সম্পন্ন $\gamma$-ফোটন ইলেকট্রনের উপর আপতিত হলে কম্পটন বিক্ষেপ তত্ত্ব অনুযায়ী ইলেকট্রনটি কিছু পরিমাণ ভরবেগ প্রাপ্ত হয়। যেহেতু বিক্ষিপ্ত ফোটনটি $\alpha$ অর্ধশীর্ষ কোণের মধ্যে যে কোন স্থান দিয়ে অণুবীক্ষণের ভিতরে প্রবেশ করতে পারে, অতএব প্রতিক্ষিপ্ত (Recoil) ইলেকট্রন কর্তৃক অর্জিত ভরবেগের $x$-উপাংশের পরিমাপের মধ্যে কিছু অনিশ্চয়তা থেকে যাবে, যার মান হবে

$$\Delta p_x = p \sin \alpha = \frac{h}{\lambda} \sin \alpha \qquad (7·25)$$

এখানে $h/\lambda$ হচ্ছে ফোটনটির ভরবেগ।

সুতরাং ইলেকট্রনের অবস্থান এবং ভরবেগের সমকালীন পরিমাপের অনিশ্চয়তাদ্বয়ের গুণফল হবে ( সমীকরণ 7·24 এবং 7·25 দ্রষ্টব্য ) ঃ

$$\Delta x . \Delta p_x = \frac{\lambda}{\sin \alpha} \cdot \frac{h}{\lambda} \sin \alpha = h$$

উপরে প্রদত্ত সম্পর্কটি হাইসেনবার্গের অনিশ্চয়তা সম্পর্ক (7·23) থেকে অভিন্ন।

এখানে উল্লেখযোগ্য যে হাইসেনবার্গের অনিশ্চয়তা মতবাদ অন্যভাবেও প্রকাশ করা যায়। যদি $t$ সময়ে কোন ভৌত মণ্ডলীর (Physical System) শক্তি হয় $E$, তাহলে দেখান যায় যে

$$\Delta E . \Delta t \geq h \qquad (7{\cdot}26)$$

এখানে $\Delta E$ হচ্ছে পরিমিত শক্তির মানের অনিশ্চয়তা এবং $\Delta t$ হচ্ছে সময় পরিমাপের অনিশ্চয়তা।

## 7·9 : অনিশ্চয়তাবাদের বিভিন্ন পরিণাম

যেহেতু অনিশ্চয়তাবাদ অনুসারে কোন বস্তু কণিকার অবস্থান সঠিকভাবে নির্ণয় করা সম্ভব নয়, অতএব বোর তত্ত্বে পরমাণুর মধ্যে আবর্তনশীল ইলেকট্রনের যে নির্দিষ্ট কক্ষপথগুলির কথা কল্পনা করা হয়, প্রকৃতপক্ষে সেরূপ নির্দিষ্ট কক্ষপথের কল্পনা বাস্তব ভিত্তিক হতে পারে না। হাইড্রোজেন পরমাণুতে $n=1$ কক্ষপথে আবর্তনশীল ইলেকট্রনের বেগ হচ্ছে $v=2\pi e^2/h$ (3·8 সমীকরণ দ্রষ্টব্য)। সুতরাং ইলেকট্রনটির দ্য ব্রয় তরঙ্গদৈর্ঘ্য হচ্ছে

$$\lambda = \frac{h}{mv} = \frac{h^2}{2\pi m e^2} = 3{\cdot}31 \text{ অ্যাং}$$

অপরপক্ষে হাইড্রোজেনের প্রথম বোর কক্ষপথের ব্যাসার্ধ হচ্ছে $a_0 = 0{\cdot}529$ অ্যাং, যা উপরে প্রদত্ত $\lambda$ অপেক্ষা অনেক ছোট। যেহেতু ইলেকট্রনের অবস্থান তার দ্য ব্রয় তরঙ্গদৈর্ঘ্যের বিস্তৃতির মধ্যে যে কোন স্থানে হতে পারে, স্পষ্টতঃ এইরূপ ক্ষুদ্র কক্ষপথে এত দীর্ঘ দ্য ব্রয় তরঙ্গদৈর্ঘ্য সম্পন্ন ইলেকট্রনের আবর্তনের কল্পনা অর্থহীন হয়ে পড়ে। অপরপক্ষে প্রথম বোর কক্ষপথের পরিধি হচ্ছে (3·6 সমীকরণ দ্রষ্টব্য)

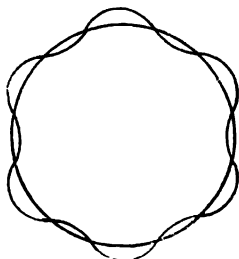
$$2\pi a_0 = 2\pi \frac{h^2}{4\pi^2 m e^2} = \frac{h^2}{2\pi m e^2}$$

অর্থাৎ এই পরিধির মান উপরে প্রদত্ত ইলেকট্রনের দ্য ব্রয় তরঙ্গদৈর্ঘ্যের সমান। এইরূপ হওয়ার কারণ দ্য ব্রয় সমীকরণ (7·2) থেকে খুঁজে পাওয়া যায়। যেহেতু আবর্তনশীল ইলেকট্রনের কৌণিক ভরবেগ হচ্ছে

$$mvr = nh/2\pi$$

অতএব দ্য ব্রয় তত্ত্ব থেকে পাওয়া যায়

$$2\pi r = n\frac{h}{mv} = n\lambda$$

অর্থাৎ বোর তত্ত্বে বর্ণিত ইলেকট্রনের কক্ষপথের পরিধির মধ্যে পূর্ণ-সংখ্যক দ্য ব্রয় তরঙ্গ থাকবে। প্রথম বোর কক্ষপথে ($n = 1$) একটি মাত্র পূর্ণ তরঙ্গ

চিত্র 7·11

বোর কক্ষপথে দ্য ব্রয় তরঙ্গ।

থাকবে। দ্বিতীয়, তৃতীয় প্রভৃতি কক্ষপথে পূর্ণ তরঙ্গের সংখ্যা যথাক্রমে দুই, তিন ইত্যাদি হবে ( 7·11 চিত্র দ্রষ্টব্য )

দার্শনিক এবং তাত্ত্বিক বিচারে হাইসেনবার্গের অনিশ্চতাবাদের গুরুত্ব অপরিসীম। যেহেতু পরমাণবিক মাত্রা সম্পন্ন কণিকার অবস্থান এবং ভরবেগের কোন নিশ্চিত পরিমাপ সম্ভব নয়, সুতরাং কণিকা গতিবিদ্যা অনুযায়ী এদের গতিবিধি সম্বন্ধে কোন তত্ত্ব উদ্ভাবন করা সম্ভব নয়। সেইজন্য বোর, সমারফেল্ড প্রভৃতি বিজ্ঞানীগণ কর্তৃক উদ্ভাবিত পুরাতন কোয়ানটাম তত্ত্বের সাহায্যে পরমাণুর মধ্যে ইলেকট্রনের গতির এবং পরমাণু নিঃসৃত বর্ণালীর সঠিক ব্যাখ্যা সম্ভব হয় না। অনিশ্চয়তাবাদের অন্যতম গুরুত্বপূর্ণ পরিণাম হচ্ছে যে পদার্থবিদ্যার সনাতন তত্ত্বসমূহের মূলভিত্তি 'কার্য কারণ সম্বন্ধ' (Law of Causality) পরমাণবিক মাত্রা সম্পন্ন বস্তু কণিকার বা আলোক কণিকার ক্ষেত্রে প্রযোজ্য নয়। এক্ষেত্রে 'নিশ্চয়তার' পরিবর্তে 'সম্ভাব্যতা' (Probability) দ্বারাই বিভিন্ন প্রাকৃতিক ঘটনাবলীর অনুষ্ঠান নির্ধারিত হয়। অর্থাৎ কোন সংঘটন (Phenomenon) নিশ্চিত-ভাবে ঘটবে এ কথা না বলে ঘটবার সম্ভাব্যতা গাণিতিক সূত্র দ্বারা প্রকাশ করা প্রয়োজন। উদাহরণস্বরূপ বলা যেতে পারে যে একটি রেখাছিদ্রের মধ্য দিয়ে একটি ইলেকট্রন পাঠালে সেটি অপর দিকে স্থাপিত একটি পর্দা বা ফোটোগ্রাফিক প্লেটের উপর ঠিক কোন বিন্দুতে আপতিত হবে তা নিশ্চিতভাবে বলা সম্ভব

নয়। শুধু এইটুকু বলা যায় যে পর্দার বিভিন্ন বিন্দুতে ইলেকট্রনটি আপতিত হবার সম্ভাব্যতা কত। যদি একটির পর একটি ইলেকট্রন দীর্ঘ সময় ধরে উক্ত রেখাছিদ্রের মধ্য দিয়ে পাঠান যায়, তাহলে ফোটোগ্রাফিক প্লেটের উপর একটি ইলেকট্রন ব্যবর্তন নক্‌শা উৎপন্ন হয়। বিভিন্ন বিন্দুতে এই নক্‌শার তীব্রতা পরিমাপ করে উক্ত বিন্দুগুলিতে আপতিত ইলেকট্রন সংখ্যা কত তা বোঝা যায়। মোট প্রেরিত ইলেকট্রনের সংখ্যা দ্বারা উক্ত সংখ্যাকে ভাগ করলে, বিভিন্ন বিন্দুতে একটি মাত্র ইলেকট্রন আপতনের সম্ভাব্যতা নিরূপণ করা যায়। এই সম্ভাব্যতা হচ্ছে ইলেকট্রনটির সংশ্লিষ্ট দ্য ব্রয় তরঙ্গের তীব্রতার (Intensity) সমানুপাতিক। সুতরাং $N$ যদি প্লেটের উপর কোন বিন্দুতে আপতিত ইলেকট্রনের সংখ্যা হয় এবং $y_0$ যদি হয় উক্ত বিন্দুতে দ্য ব্রয় তরঙ্গের 'বিস্তার' (Amplitude), তাহলে স্পষ্টতঃ

$$N \propto |y_0|^2$$

এইভাবে দ্য ব্রয় তরঙ্গের একটা 'সাংখ্যায়নিক' (Statistical) ব্যাখ্যা সম্ভব।

## 7·10 : শ্রোডিংগার তরঙ্গ সমীকরণ

উপরের আলোচনা অনুযায়ী প্রত্যেক বস্তু কণিকার সংগে যদি একটি করে তরঙ্গ সংশ্লিষ্ট করতে হয়, তাহলে উক্ত তরঙ্গের গতি প্রকাশ করবার জন্য একটি অবকল সমীকরণ (Differential Equation) উদ্ভাবিত করা প্রয়োজন। জার্মান বিজ্ঞানী শ্রোডিংগার (Erwin Schrödinger) সর্বপ্রথম এইরূপ একটি সমীকরণ উদ্ভাবিত করেন। তরঙ্গ তত্ত্ব অনুযায়ী $x$-দিকে সঞ্চারিত তরঙ্গের গতির জন্য অবকল সমীকরণ হচ্ছে

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} = \frac{1}{u^2}\frac{\partial^2 \psi}{\partial t^2} \qquad (7·27)$$

এখানে $\psi$ হচ্ছে $t$ সময়ে যে কোন বিন্দুতে তরঙ্গ মধ্যস্থ সরণ (Displacement) এবং $u$ হচ্ছে তরঙ্গ-বেগ। যদি তরঙ্গের কম্পাংক হয় $\nu$ এবং তরঙ্গদৈর্ঘ্য হয় $\lambda$, তাহলে সময়ের সংগে তরঙ্গ বিক্ষোভ সরল সমঞ্জসভাবে পরিবর্তিত হয় বলে ধরে নিলে লেখা যায়

$$\psi = \varphi e^{2\pi i \nu t}$$

এখানে $\varphi = \varphi(x)$ হচ্ছে যে কোন বিন্দুতে তরঙ্গের বিস্তার (Amplitude)। অর্থাৎ $\varphi$ নির্ভর করে $x$ সংখ্যাটির উপর।

সুতরাং $\dfrac{\partial^2 \psi}{\partial t^2} = -4\pi^2\nu^2\psi = -4\pi^2\nu^2\varphi e^{2\pi i\nu t}$

অতএব সমীকরণ (7·27) থেকে পাওয়া যায়

$$\frac{d^2\varphi}{dx^2} = -\frac{4\pi^2\nu^2}{u^2}\varphi$$

আবার তরঙ্গ-বেগ $u = \nu\lambda$ ; সুতরাং

$$\frac{d^2\varphi}{dx^2} = -\frac{4\pi^2}{\lambda^2}\varphi \qquad (7·28)$$

এখন কণিকাটির দ্য ব্রয় তরঙ্গদৈর্ঘ্য হচ্ছে

$$\lambda = \frac{h}{mv} = \frac{h}{\sqrt{2m(E-V)}}$$

এখানে $(E-V)$ হচ্ছে কণিকাটির গতিশক্তি ; $E$ এবং $V$ হচ্ছে যথাক্রমে কণিকাটির মোট শক্তি এবং স্থিতিশক্তি। সাধারণতঃ স্থিতিশক্তি $V$ নির্ভর করে অবস্থান $x$ এর উপর, অর্থাৎ $V = V(x)$ হয়। অতএব সমীকরণ (7·28) থেকে পাওয়া যায়

$$\frac{d^2\varphi}{dx^2} = -\frac{4\pi^2}{h^2}\,2m(E-V)\,\varphi$$

অর্থাৎ
$$\frac{d^2\varphi}{dx^2} + \frac{8\pi^2 m}{h^2}(E-V)\,\varphi = 0 \qquad (7·29)$$

সমীকরণ (7·29) হচ্ছে এক মাত্রিক (One Dimensional) গতির ক্ষেত্রে প্রযোজ্য শ্রোডিংগার তরঙ্গ সমীকরণ (Wave Equation)। $x$-এর সংগে $V$ পরিবর্তনের গাণিতিক সম্পর্ক জানা থাকলে (7·29) সমীকরণটি সমাকলন করা যায়। ত্রিমাত্রিক গতির ক্ষেত্রে $V$ নির্ভর করে $x$, $y$ এবং $z$ স্থানাংকত্রয়ের উপরে। এক্ষেত্রে শ্রোডিংগার সমীকরণ হয়

$$\nabla^2\varphi + \frac{8\pi^2 m}{h^2}(E-V)\varphi = 0 \qquad (7·30)$$

এখানে $\nabla^2\varphi = \dfrac{\partial^2\varphi}{\partial x^2} + \dfrac{\partial^2\varphi}{\partial y^2} + \dfrac{\partial^2\varphi}{\partial z^2}$

## 7·11: হাইড্রোজেন পরমাণুর ক্ষেত্রে শ্রোডিংগার সমীকরণ প্রয়োগের ফলে প্রাপ্ত সিদ্ধান্তসমূহ

হাইড্রোজেন পরমাণুর মধ্যে ইলেকট্রনটির স্থিতিশক্তি হয়

$V = V(r) = -\frac{e^2}{r}$ ; সুতরাং সমীকরণ (7·30) থেকে পাওয়া যায়

$$\nabla^2\psi + \frac{8\pi^2 m}{h^2}(E + e^2/r)\psi = 0 \qquad (7\cdot31)$$

উপরের সমীকরণের সমাধান বর্তমান গ্রন্থের আলোচ্য বিষয় বহির্ভূত। এখানে কেবল এই সমাধানের গুরুত্বপূর্ণ সিদ্ধান্তগুলি আলোচনা করা যেতে পারে। উপরোক্ত সমীকরণের সমাধান এমন হওয়া প্রয়োজন যে $\psi$ এবং এর অবকলক (Derivative) প্রতি বিন্দুতে সীমিত (Finite), নিরবচ্ছিন্ন (Continuous) এবং একক মান সম্পন্ন (Single Valued) হবে। এইরূপ 'সীমা-শর্ত' (Boundary Condition) দ্বারা নির্ধারিত $\psi$ কে বলা হয় 'আইগেন-অপেক্ষক (Eigen Function)। দেখান যায় যে হাইড্রোজেন পরমাণুর ক্ষেত্রে প্রযোজ্য শ্রোডিংগার সমীকরণের এইরূপ সীমা-শর্ত দ্বারা নির্ধারিত সমাধান তখনই সম্ভব যখন উক্ত পরমাণুর ইলেকট্রনের মোট শক্তি $E$ হয়

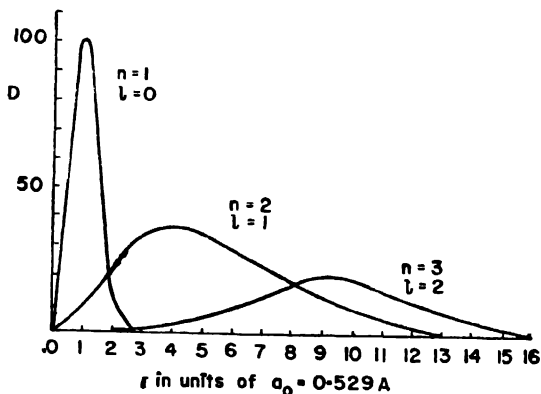
$$E = E_n = -\frac{2\pi^2 m e^4}{n^2 h^2}$$

এখানে $n = 1,2,3$ প্রভৃতি পূর্ণসংখ্যা। অর্থাৎ ইলেকট্রনটির সম্ভাব্য শক্তি বোর তত্ত্ব থেকে প্রাপ্ত শক্তির সমান হয়।

পূর্বেই বলা হয়েছে যে $|\psi|^2 = \psi^*\psi$ সংখ্যাটি হচ্ছে নির্দিষ্ট বিন্দুতে ইলেকট্রনের অবস্থানের সম্ভাব্যতার সমানুপাতিক। বস্তুতঃ $d\tau$ আয়তনের মধ্যে ইলেকট্রনটির অবস্থানের সম্ভাব্যতার মান $|\psi|^2 d\tau$ হয়।

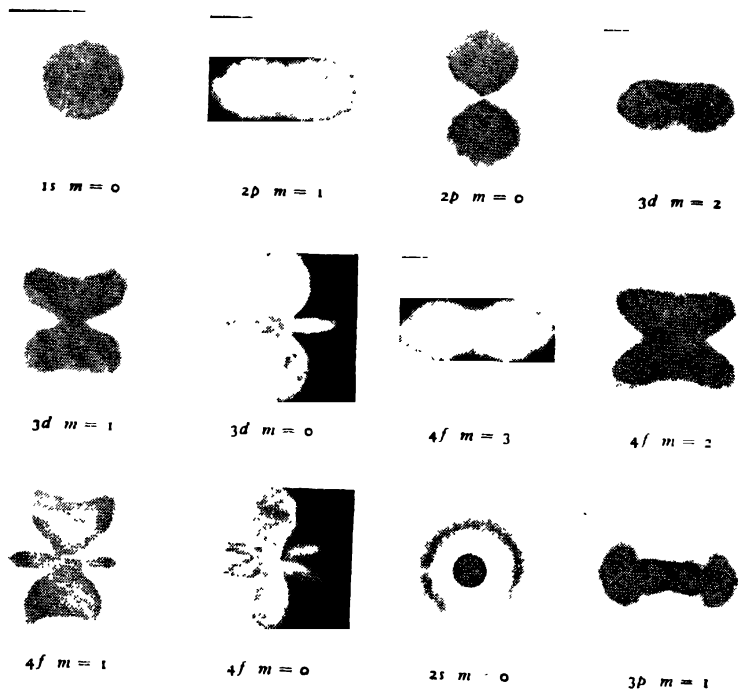
যেহেতু কেন্দ্রক থেকে সব দূরত্বেই $|\psi|^2$ সংখ্যাটির একটা সীমিত (Finite) মান থাকতে পারে, অতএব সিদ্ধান্ত করা যায় যে কেন্দ্রক থেকে সকল দূরত্বেই ইলেকট্রনটির অবস্থানের একটা সীমিত সম্ভাব্যতা আছে। অবশ্য এই সম্ভাব্যতা কোথাও বেশী, কোথাও কম হয়। যদি কেন্দ্রককে বেষ্টন করে $r$ এবং $r + dr$ ব্যাসার্ধ সম্পন্ন দুটি গোলক আঁকা যায়, তাহলে এই দুটি গোলকের মধ্যবর্তী খোলসে ইলেকট্রনটির অবস্থানের সম্ভাব্যতা হয়

$$|\psi|^2 d\tau = 4\pi r^2 |\psi|^2 dr = D dr$$

এখানে $D = 4\pi^2 r^2 |\psi|^2$ সংখ্যাটিকে বলা হয় ইলেকট্রন 'বণ্টন-অপেক্ষক' (Distribution Function)। (7·12) চিত্রে $n=1$ এর ক্ষেত্রে উক্ত বণ্টন অপেক্ষক $D$ এবং $r$ এর লেখচিত্র দেখান হয়েছে। এই চিত্র

চিত্র 7·12

হাইড্রোজেন পরমাণুর মধ্যে ইলেকট্রন বণ্টনের লেখচিত্ররূপ।

থেকে বোঝা যায় যে ইলেকট্রনটির আধান যেন মেঘের মত কেন্দ্রককে ঘিরে বিস্তীর্ণ অঞ্চলে বিস্তৃত থাকে। যেখানে $D$ বেশী সেখানে এই ইলেকট্রন-মেঘের ঘনত্ব বেশী, আর যেখানে $D$ কম সেখানে এর ঘনত্ব কম। চিত্র থেকে দেখা যায় যে কেন্দ্রক থেকে একটা নির্দিষ্ট দূরত্বে বণ্টন-অপেক্ষক বৃহত্তম হয়। এই নির্দিষ্ট দূরত্ব বোর তত্ত্ব থেকে প্রাপ্ত ইলেকট্রনের কক্ষপথের ব্যাসার্ধের সমান ($r = a_0$) পাওয়া যায় (7·13) চিত্রে ইলেকট্রন মেঘের এই বিস্তৃতির চিত্ররূপ দেখান হয়েছে। $n = 1,2,3$ প্রভৃতি ক্ষেত্রে ইলেকট্রন মেঘের বিস্তৃতি আরও জটিল হয়।

শ্রোডিংগার এবং তাঁর পরে হাইসেনবার্গ, ডিরাক্ প্রমুখ বিজ্ঞানীগণ এই নূতন 'তরঙ্গ বলবিদ্যা' (Wave Mechanics) বা কোয়ানটাম বলবিদ্যা (Quantum Mechanics) তত্ত্ব সুদৃঢ় ভাবে প্রতিষ্ঠিত করেন। বর্তমান যুগে এই নূতন তত্ত্বের সাহায্যে শুধু যে হাইড্রোজেন বা হাইড্রোজেন-সদৃশ পরমাণুর বর্ণালীর সঠিক ব্যাখ্যা করা যায় তা নয়, জটিলতর পরমাণু এবং কেন্দ্রকের গঠনও এই নূতন তত্ত্বের সাহায্যে ব্যাখ্যা করা যায়। বস্তুতঃ

চিত্র 7·13

ইলেকট্রন মেঘ।

পরমাণবিক জগতের সর্বক্ষেত্রে এই নূতন তত্ত্বের প্রয়োগ বর্তমানে সার্বিকভাবে স্বীকৃত।

## 7·12 : ইলেকট্রন অণুবীক্ষণ

ইলেকট্রনের তরঙ্গরূপকে নানাপ্রকার ব্যবহারিক প্রয়োজনে প্রয়োগ করা হয়। এর মধ্যে সর্বাপেক্ষা গুরুত্বপূর্ণ প্রয়োগ হচ্ছে 'ইলেকট্রন-অণুবীক্ষণ' (Electron Microscope) নামক যন্ত্রের উদ্ভাবন।

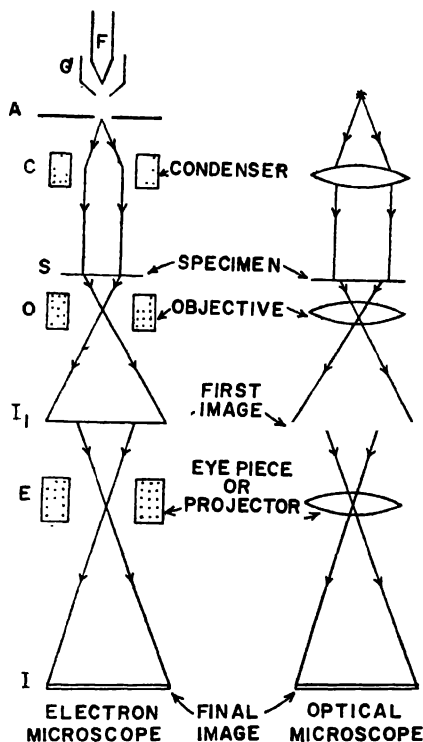
অণুবীক্ষণ যন্ত্রের সাহায্যে ক্ষুদ্র ক্ষুদ্র বস্তুর পরিবর্ধিত প্রতিবিম্ব পাওয়া যায়। তাছাড়া বস্তুগুলির পুংখানুপুংখ গঠনও (Datailed Structure) অণুবীক্ষণের সাহায্যে প্রকটিত হয়। অণুবীক্ষণের বিশ্লেষণ ক্ষমতা যত অধিক হয়, সেটির সাহায্যে কোন বস্তুর পুংখানুপুংখ গঠন নির্ণয় করা তত সহজ হয়। সাধারণ অণুবীক্ষণে দৃশ্যমান আলোক ব্যবহার করা হয়। (7·9) অনুচ্ছেদে আমরা দেখেছি যে আলোকের তরঙ্গদৈর্ঘ্য $\lambda$ যত ক্ষুদ্র হয়, অণুবীক্ষণের বিশ্লেষণ ক্ষমতাও তত বেশী হয়। সাধারণ অণুবীক্ষণের ক্ষেত্রে বিশ্লেষণ ক্ষমতা দৃশ্যমান আলোকের তরঙ্গদৈর্ঘ্যের সমমাত্রিক হয়, অর্থাৎ কয়েক সহস্র অ্যাংস্ট্রমের মত হয়। অপরপক্ষে ইলেকট্রন তরঙ্গের তরঙ্গদৈর্ঘ্য দৃশ্যমান আলোকের তুলনায় অনেক ক্ষুদ্রতর করা যেতে পারে। 10,000 ভোল্ট বিভব-প্রভেদের দ্বারা আকৃষ্ট করলে একটি ইলেকট্রন 10,000 ই-ভো শক্তি অর্জন করে। সমীকরণ (7·14) অনুসারে এইরূপ শক্তি সম্পন্ন ইলেকট্রনের তরঙ্গদৈর্ঘ্য হয়

$$\lambda = \frac{h(1 - eV/m_0c^2)}{\sqrt{2m_0eV}}$$

$$= \frac{6{\cdot}62 \times 10^{-27}(1 - 10^4/5 \times 10^5)}{\sqrt{2 \times 9{\cdot}11 \times 10^{-28} \times 10^4 \times 1{\cdot}6 \times 10^{-12}}}$$

$$= 0{\cdot}12 \text{ অ্যাংস্ট্রম}$$

উচ্চতর বিভব প্রভেদের দ্বারা আকৃষ্ট ইলেকট্রনের দ্য ব্রয় তরঙ্গদৈর্ঘ্য আরও ক্ষুদ্র হয়। সুতরাং মাত্র কয়েক অ্যাংস্ট্রম বিশ্লেষণ ক্ষমতা সম্পন্ন ইলেকট্রন অণুবীক্ষণ সহজেই নির্মাণ করা যায়। (7·14) চিত্রে একটি ইলেকট্রন অণুবীক্ষণের সরল রেখাচিত্র দেখান হয়েছে। (7·15) চিত্রে একটি আধুনিক ইলেকট্রন অণুবীক্ষণের আলোকচিত্র দেখান হয়েছে। সাধারণ অণুবীক্ষণের লেন্স্ প্রভৃতি বিভিন্ন অংশের পরিবর্তে ইলেকট্রন অণুবীক্ষণে চৌম্বক ক্ষেত্র

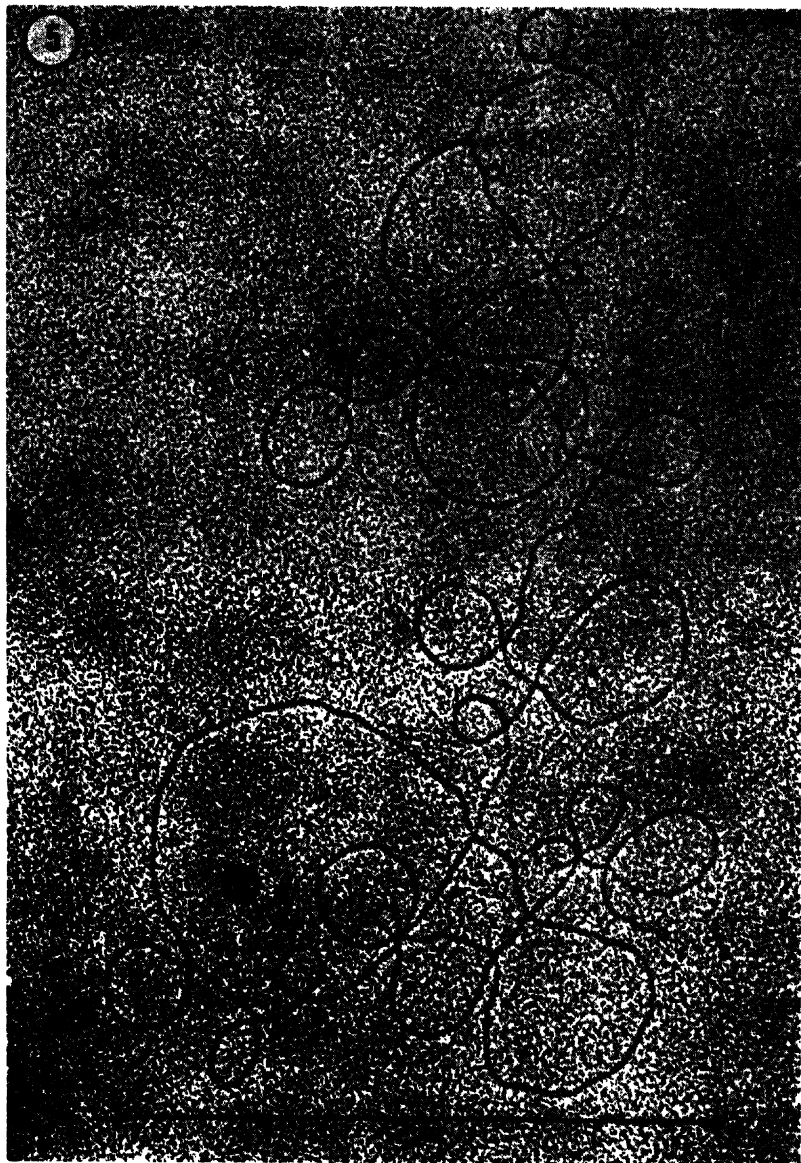
এবং তড়িৎক্ষেত্র ব্যবহার করা হয়। একটি তড়িৎবাহী কুণ্ডলীর সাহায্যে ইলেকট্রনগুলিকে ফোকাস করা সম্ভব। অর্থাৎ এইরূপ কুণ্ডলী লেন্সের কাজ করে।

চিত্র 7·14

ইলেকট্রন অণুবীক্ষণ। C, O এবং E হচ্ছে তিনটি তারের কুণ্ডলী, যাদের মধ্যে তড়িৎ প্রবাহ পাঠিয়ে অক্ষীয় চৌম্বক ক্ষেত্র উৎপন্ন করা হয়। এই চৌম্বক ক্ষেত্রগুলি ইলেকট্রন লেন্সের কাজ করে।

(7·14) চিত্র থেকে দেখা যায় যে একটি উত্তপ্ত ধাতব তন্তু F থেকে নিঃসৃত তাপীয় ইলেকট্রনগুলিকে প্রথমে উচ্চ বিভব প্রভেদ (50 থেকে 100 কি-ভো) প্রয়োগ করে A অ্যানোডের দিকে আকৃষ্ট করা হয়। অ্যানোডে পৌঁছবার আগে ইলেকট্রনগুলিকে গ্রিড (Grid) G পার হয়ে যেতে হয়। এই

চিত্র 7·15

ইলেকট্রন অণুবীক্ষণের আলোকচিত্র।

( সাহা ইনস্টিটিউট অভ্ নিউক্লীয়ার ফিজিক্স,
কলিকাতা, বায়োফিজিক্স বিভাগ, ইলেকট্রন
মাইক্রস্কোপি গ্রুপের সৌজন্যে প্রাপ্ত )

চিত্র 7·16

ইলেকট্রন অণুবীক্ষণের সাহায্যে গৃহীত ব্যাক্টিরিও ফাজ T7 থেকে প্রতিক্ষিপ্ত DNA অণুর ইলেকট্রন মাইক্রোগ্রাফ।

( সাহা ইন্স্টিটিউট অভ্ নিউক্লীয়ার ফিজিক্স্, কলিকাতা, বায়োফিজিক্স্ বিভাগ, ইলেকট্রন মাইক্রসকোপি গ্রুপের সৌজন্যে প্রাপ্ত )

গ্রিডের বিভব পরিবর্তন করে অ্যানোডে সংগৃহীত ইলেকট্রনের সংখ্যা পরিবর্তন করা যায়, অর্থাৎ ইলেকট্রন রশ্মির তীব্রতা নিয়ন্ত্রিত করা যায়। অ্যানোড তলের উপরের একটি ছিদ্র দিয়ে শক্তিশালী ইলেকট্রনগুচ্ছ অপর দিকে নিঃসৃত হয়ে C চৌম্বক ক্ষেত্রের দ্বারা অভিসৃত (Condensed) হয়ে পরীক্ষাধীন S নিদর্শন বস্তুর (Specimen) উপর আপতিত হয়। নিদর্শন বস্তুটি খুব পাতলা হওয়া দরকার, যাতে বিশেষ কোন শক্তিক্ষয় না করে ইলেকট্রনগুচ্ছ সেটিকে ভেদ করে অপরদিকে নিঃসৃত হতে পারে। নিঃসৃত ইলেকট্রনগুচ্ছ এর পরে O চিহ্নিত আর একটি চৌম্বক ক্ষেত্রের মধ্য দিয়ে পার হয়ে যায়। এই চৌম্বকক্ষেত্রটি অণুবীক্ষণের অভিলক্ষ্য (Objective) লেন্সের মত কাজ করে। এই চৌম্বক অভিলক্ষ্যের সাহায্যে নিদর্শন বস্তুর একটি পরিবর্ধিত মধ্যবর্তী প্রতিবিম্ব $I_1$ সৃষ্ট হয়। এরপর ইলেকট্রনগুচ্ছ E চিহ্নিত আর একটি চৌম্বক ক্ষেত্রের মধ্য দিয়ে পার হয়ে যায়। এই চৌম্বক-ক্ষেত্র সাধারণ অণুবীক্ষণের অভিনেত্রের (Eye Piece) ন্যায় কাজ করে। ইলেকট্রন অণুবীক্ষণে অবশ্য চৌম্বক অভিনেত্র থেকে নির্গত ইলেকট্রনগুচ্ছ নিদর্শন বস্তুর যে চরম (Final) প্রতিবিম্ব I সৃষ্ট করে, তা হয় একটি প্রতিপ্রভ পর্দার উপর প্রক্ষিপ্ত হয়, আর না হয় একটি ফোটোগ্রাফিক প্লেটের সাহায্যে সেটির আলোকচিত্র গ্রহণ করার ব্যবস্থা থাকে।

(7·14) চিত্রে ইলেকট্রন অণুবীক্ষণের রেখাচিত্রের পাশাপাশি একটি সাধারণ অণুবীক্ষণের রেখাচিত্রও প্রদর্শিত হয়েছে, যার সাহায্যে ইলেকট্রন অণুবীক্ষণের বিভিন্ন অংশের কার্যপ্রণালী সুস্পষ্টরূপে বোঝা যায়।

যেহেতু ইলেকট্রনগুলি খুব সহজেই বিভিন্ন পদার্থ দ্বারা শোষিত বা বিক্ষিপ্ত হতে পারে, সেজন্য সমগ্র যন্ত্রটি খুব নিম্ন বায়ু চাপে ( $< 10^{-5}$ মিমি Hg ) রাখা হয়, যাতে যন্ত্রের অভ্যন্তরস্থ বায়ুর দ্বারা ইলেকট্রনগুচ্ছের শোষণ বা বিক্ষেপ উপেক্ষণীয় হয়।

(7·16) চিত্রে ইলেকট্রন-অণুবীক্ষণের সাহায্যে প্রাপ্ত একটি নিদর্শন বস্তুর প্রতিবিম্বের আলোকচিত্র দেখান হয়েছে।

## পরিচ্ছেদ ৪

# আইনষ্টাইনের বিশেষ আপেক্ষিকতাবাদ

### ৪'1 : নির্দেশক ফ্রেম ; নিউটনের আপেক্ষিকতাবাদ

একথা সুবিদিত যে কোন বস্তুর অবস্থান নির্ণয় করতে হলে কয়েকটি নির্দিষ্ট অক্ষের সাপেক্ষে বস্তুটির স্থানাংক সমূহের (Coordinates) মান জানা প্রয়োজন। কোন কক্ষতলের উপর যদি একটি বল পড়ে থাকে তাহলে সেটির অবস্থান নির্ণয় করা যায় যদি দুটি পরস্পরের অভিলম্বে অবস্থিত দেওয়াল এবং কক্ষতলের সংযোগ সরলরেখাদ্বয় থেকে বলটির দূরত্ব মাপা যায়। আবার কক্ষের ছাদ থেকে ঝুলান একটি বৈদ্যুতিক বাতির বালবের অবস্থান নির্ণয় করতে হলে কক্ষতল এবং দুটি পরস্পর সংলগ্ন দেওয়াল থেকে বালব্‌টির কোন নির্দিষ্ট বিন্দুর দূরত্ব জানা প্রয়োজন। এই ধরনের অবস্থান নির্ণয়ের ক্ষেত্রে অবশ্য ধরে নেওয়া হয় যে বস্তুগুলি কক্ষের মধ্যে স্থির অবস্থায় আছে। সেইজন্য অবস্থান পরিমাপে সময়ের কোন উল্লেখ করা হয় নি। কিন্তু যদি বস্তুগুলি সঞ্চরণশীল হয়, তাহলে পরিমাপ কালেরও উল্লেখ করার প্রয়োজন হয়। যেমন কক্ষতলের উপর কোন পতঙ্গের অবস্থান প্রতি মুহূর্তে পরিবর্তিত হয়। সুতরাং তার অবস্থান স্থানাংকগুলি নির্দেশ করার সংগে সংগে নির্দিষ্ট মাপনীতে পরিমিত সময়ও নির্দেশ করতে হয়। অর্থাৎ নির্দিষ্ট কয়েকটি অবস্থান-মাপক অক্ষ এবং সময়-মাপক মাপনীর সাহায্যে যে কোন বস্তুর অবস্থান সম্পর্কীয় যাবতীয় তথ্য জানা সম্ভব। এইরূপ নির্দিষ্ট অবস্থান-মাপক অক্ষগুলির এবং সময়-মাপনীর সমন্বয়কে বলা যায় একটি 'নির্দেশক ফ্রেম' (Frame of Reference)। একটি নির্দিষ্ট নির্দেশক ফ্রেমে স্থিরাবস্থায় আসীন নিরীক্ষকের (Observer) পক্ষে উক্ত ফ্রেমের সাপেক্ষে কোন বস্তুর বা কোন 'ভৌত মণ্ডলীর' (Physical System) প্রতি মুহূর্তের অবস্থান নির্ণয় করা সম্ভব হয়।

নির্দেশক ফ্রেম অনেক রকম হতে পারে। যেমন কক্ষতলের উপর অবস্থিত বলটির অবস্থান উত্তর ও পশ্চিম দিকের দেওয়াল দুটির সংগে কক্ষতলের সংযোগ সরলরেখা দুটির সাপেক্ষে নির্দেশ করা যায়, আবার দক্ষিণ এবং পূর্ব দিকের দেওয়াল ও কক্ষতলের সংযোগ সরলরেখা দুটির সাপেক্ষেও নির্দেশ করা যায়। দুই ক্ষেত্রে অবশ্য পরিমিত স্থানাংকগুলি পৃথক হবে। এখানে

উল্লেখযোগ্য যে উপরোক্ত নির্দেশক ফ্রেম দুটি পরস্পরের সাপেক্ষে স্থিরাবস্থায় থাকে। এইরূপ দুটি ফ্রেমে পরিমিত অবস্থান স্থানাংকগুলির মধ্যে গাণিতিক সম্পর্ক সহজেই নির্ণয় করা যায়।

অনেক ক্ষেত্রে দুটি নির্দেশক ফ্রেম এমন হতে পারে যে একটির সাপেক্ষে অন্যটি গতিশীল হয়। এদের মধ্যে একটিকে যদি আমরা স্থির-ফ্রেম (Rest Frame) বলে মনে করি, তাহলে এর সাপেক্ষে গতিশীল অন্য ফ্রেমটির বেগ জানা থাকলে দুটি ফ্রেমে পরিমিত অবস্থান স্থানাংকগুলির মধ্যেও গাণিতিক সম্পর্ক নির্ণয় করা যেতে পারে। সাধারণতঃ দুটি ফ্রেমে সময়ের মাপ অভিন্ন এইটাই ধরে নেওয়া হয়। উদাহরণস্বরূপ সমবেগে বিচরণশীল একটি গাড়ীর কথা বিবেচনা করা যাক। গাড়ীর কোন আরোহী যদি এর উপর অবস্থিত একটি বস্তুর অবস্থান নির্ণয় করতে চান তাহলে তাঁকে গাড়ীর সংগে সংলগ্ন নির্দেশক ফ্রেমের সাহায্য নিতে হবে। যদি বস্তুটি গাড়ীর সাপেক্ষে গতিশীল হয়, তাহলে আরোহী গাড়ীর সাপেক্ষে সেটির বেগ নির্ণয় করতে পারেন। এই বেগ কিন্তু পথের উপর দণ্ডায়মান কোন নিরীক্ষক কর্তৃক নির্ণীত বেগ থেকে পৃথক হবে। কারণ এই দ্বিতীয় নিরীক্ষককে পথের সংগে সংলগ্ন কোন নির্দেশক ফ্রেমের সাপেক্ষে পরিমাপ করতে হবে। উদাহরণস্বরূপ প্রতি সেকেণ্ডে 10 মিটার বেগ সম্পন্ন একটি গাড়ীর উপর 1 মিটার/সেকেণ্ড বেগে গতিশীল একটি ছোট খেলনা মোটর গাড়ীর কথা বিবেচনা করা যাক। ধরা যাক যে খেলনাটি গাড়ীর গতির অভিমুখে বিচরণশীল। স্পষ্টতঃ গাড়ীর উপরে অবস্থিত নিরীক্ষক খেলনা গাড়ীর বেগ পরিমাপ করলে পাবেন 1 মিটার প্রতি সেকেণ্ডে। কিন্তু পথে দণ্ডায়মান নিরীক্ষক উক্ত বেগ পরিমাপ করলে পাবেন 11 মিটার প্রতি সেকেণ্ডে। আর একটি পরীক্ষার কথা বিবেচনা করা যাক। গাড়ীর উপর অবস্থিত নিরীক্ষক যদি একটি স্থিতিস্থাপক বল উল্লম্ব (Vertical) দিকে গাড়ীর মসৃণ তলের উপর সজোরে নিক্ষেপ করেন তাহলে তিনি দেখবেন যে বলটি বিপরীত দিকে উল্লম্ব রেখা ধরে লাফিয়ে উঠবে। ঠিক যেমন হয় মসৃণ ভূতলের উপর একই ভাবে নিক্ষিপ্ত বলের ক্ষেত্রে। এখানে বলের গতি নিউটনের গতিসূত্র দ্বারা নির্ধারিত হয়। অপরপক্ষে পথে দণ্ডায়মান নিরীক্ষক যদি বলটির গতি পর্যবেক্ষণ করেন তাহলে তাঁর মনে হবে বলটি একটি অধিবৃত্তাকার (Parabolic) বক্রপথে নীচের দিকে আপতিত হয়ে অনুরূপ একটি বক্রপথে উপরের দিকে উঠে যাচ্ছে। গাড়ীর বেগ জানা থাকলে তিনিও নিউটনের গতিসূত্র প্রয়োগ করে বলটির ভ্রমণপথ নির্ণয় করতে

পারেন। ঠিক এর বিপরীত পরীক্ষাটি যদি করা যায়, অর্থাৎ পথে দণ্ডায়মান নিরীক্ষক যদি একটি বল উল্লম্বদিকে পথের উপর সজোরে নিক্ষেপ করেন, তাঁর মনে হবে বলটি উর্ধ্বমুখে লাফিয়ে উঠেছে, কিন্তু গাড়ীর উপর অবস্থিত নিরীক্ষকের মনে হবে যে বলটির গতিপথ অধিবৃত্তাকার।

উপরের আলোচনা থেকে প্রতীয়মান হয় যে যদিও আমাদের প্রচলিত ধারণা অনুযায়ী আমরা পথের উপর দণ্ডায়মান নিরীক্ষককে স্থির নিরীক্ষক এবং গাড়ীর উপর অবস্থিত নিরীক্ষককে চলমান নিরীক্ষক বলে মনে করি, গাড়ীর আরোহীর দৃষ্টিভঙ্গী থেকে এর বিপরীতটাই ঠিক বলে বোধ হবে। অর্থাৎ স্থির নির্দেশক ফ্রেম এবং গতিশীল নির্দেশক ফ্রেম কথা দুটি সম্পূর্ণ আপেক্ষিক (Relative)। একটি স্থির ট্রেনের কামরায় বসে থাকা আরোহী যখন পাশের লাইনের উপর আর একটি সমবেগে গতিশীল ট্রেনের দিকে তাকিয়ে থাকেন, তখন তাঁর পক্ষে বলা কঠিন কোন ট্রেনটি গতিশীল। আবার যদি প্রথম ট্রেনটি সমবেগে গতিশীল হয় এবং দ্বিতীয় ট্রেনটি স্থির থাকে তাহলেও ঠিক একই সমস্যা দেখা দেয়। যদি প্রথম ট্রেনটি স্থিরাবস্থা থেকে চলতে সুরু করে, অর্থাৎ সেটির গতি ত্বরণশীল (Accelerated) হয়, তাহলে অবশ্য আরোহীর পক্ষে বোঝা সম্ভব কোন ট্রেনটি গতিশীল। সুতরাং আমরা বলতে পারি যে দুটি পরস্পরের সাপেক্ষে সমবেগে গতিশীল নির্দেশক ফ্রেম সমতুল্য (Equivalent)। দুটির ক্ষেত্রেই নিউটনের গতিসূত্রগুলি সমভাবে প্রযোজ্য। সনাতন বলবিদ্যা অনুযায়ী সকল বস্তু বা ভৌত মণ্ডলীর গতিই নিউটনের গতিসূত্রগুলি দ্বারা নির্ধারিত হয়। একটি $m$ ভর সম্পন্ন বস্তুর উপরে $x$-দিকে ক্রিয়াশীল বল $F$ যদি উক্ত দিকে বস্তুটির $\ddot{x}$ ত্বরণ উৎপন্ন করে, তাহলে নিউটনের দ্বিতীয় সূত্র অনুযায়ী লেখা যায়

$$m\ddot{x}=F$$

এখানে স্থানাংক $x$ এবং সময় $t$ এমন একটি নির্দেশক ফ্রেমে পরিমাপ করা হয় যে উক্ত ফ্রেমে নিউটনের গতিসূত্রগুলি প্রয়োগ করা যায়; অর্থাৎ ফ্রেমটি হয় সম্পূর্ণ স্থিরাবস্থায় অথবা সমবেগে গতিশীল অবস্থায় থাকে। যদি আর একটি নির্দেশক ফ্রেম $(x', y', z', t')$ বিবেচনা করা যায় যার স্থানাংক অক্ষগুলি উপরোক্ত $(x, y, z, t)$ ফ্রেমের অক্ষগুলির সমান্তরাল এবং উক্ত ফ্রেমের সাপেক্ষে $x$-দিকে $v$ সমবেগে গতিশীল হয়, তাহলে দুটি ফ্রেমের সাপেক্ষে পরিমিত কোন বিন্দুর স্থানাংকগুলির এবং সময়ের মধ্যে নিম্নলিখিত

রূপান্তর সম্পর্কগুলি (Transformation Relations) লেখা যায় ( 8·1 চিত্র দ্রষ্টব্য ) ঃ

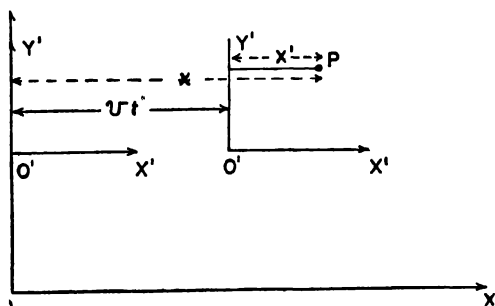
চিত্র 8·1

গ্যালিলেও রূপান্তরণের চিত্ররূপ।

$$x' = x - vt \qquad (8{\cdot}1a)$$

$$y' = y \qquad (8{\cdot}1b)$$

$$z' = z \qquad (8{\cdot}1c)$$

$$t' = t \qquad (8{\cdot}1d)$$

(8·1) সমীকরণগুলির সাহায্যে $(x, y, z, t)$ ফ্রেম থেকে $(x', y', z', t')$ ফ্রেমে রূপান্তর সম্ভব। অনুরূপে $(x', y', z', t')$ ফ্রেম থেকে $(x, y, z, t)$ ফ্রেমে রূপান্তর সম্পর্কগুলি হচ্ছে

$$x = x' + vt' \qquad (8{\cdot}2a)$$

$$y = y' \qquad (8{\cdot}2b)$$

$$z = z' \qquad (8{\cdot}2c)$$

$$t = t' \qquad (8{\cdot}2d)$$

এখানে ধরে নেওয়া হয়েছে যে $t = 0$ সময়ে দুটি নির্দেশক ফ্রেমের স্থানাংক-অক্ষগুলির মূলবিন্দু (Origin) দুটি সমাপতিত (Coincident) থাকে। (8·1) এবং (8·2) সমীকরণগুলিকে বলা হয় 'গ্যালিলেওর রূপান্তর সমীকরণ' (Galilean Transformation Equations)।

সমীকরণ (8·1a) থেকে পাওয়া যায়

$$\dot{x}' = \dot{x} - v \tag{8·3}$$

(8·3) সমীকরণের সাহায্যে এক ফ্রেম থেকে অন্য ফ্রেমে বেগ (Velocity) রূপান্তর করা সম্ভব। আবার সমীকরণ (8·3) থেকে পাওয়া যায়

$$\ddot{x}' = \ddot{x} \tag{8·4}$$

সুতরাং $(x', y', z', t')$ নির্দেশক ফ্রেমে নিউটনের দ্বিতীয় গতিসূত্র লেখা যায়

$$m\ddot{x}' = F \tag{8·5}$$

অর্থাৎ দ্বিতীয় নির্দেশক ফ্রেমে নিউটনের গতিসূত্র অপরিবর্তিত থাকে। এর থেকে সিদ্ধান্ত করা যায় যে নিউটনের গতিসূত্রগুলি সমবেগে গতিশীল অথবা স্থির, যে কোন নির্দেশক ফ্রেমে সমরূপী হয়। সুতরাং যদি কোন নিরীক্ষক একটি নির্দেশক ফ্রেমের মধ্যে সম্পূর্ণ আবদ্ধ থেকে একটি যান্ত্রিক পরীক্ষা অনুষ্ঠিত করেন, তাহলে উক্ত পরীক্ষার ফল থেকে তাঁর নির্দেশক ফ্রেমটি গতিশীল কী না তিনি তা ঠিক করতে পারবেন না। উপরে আলোচিত বল নিক্ষেপ করার পরীক্ষাটি যদি একটি সমবেগে গতিশীল এরোপ্লেনের আবদ্ধ কামরার মধ্যে করা যায়, তাহলে এই পরীক্ষার ফল থেকে এরোপ্লেনের যাত্রী ঠিক করতে পারবেন না যে প্লেনটি গতিশীল কী না। কারণ ভূপৃষ্ঠে দাঁড়িয়ে একই পরীক্ষা করলে তিনি যে ফল পেতেন এরোপ্লেনের মধ্যে একই ফল পাবেন। উপরে আলোচিত পরস্পরের সাপেক্ষে সমবেগে গতিশীল নির্দেশক ফ্রেমগুলিকে 'জড়-ফ্রেম' (Inertial Frame) নামে অভিহিত করা হয়। সনাতন বলবিদ্যার (Classical Mechanics) সূত্রগুলি সব জড়-ফ্রেমেই সমভাবে প্রযোজ্য। সকল রকম জড়-ফ্রেমের এই সমতুল্যতাকে (Equivalence) বলা হয় 'নিউটনের আপেক্ষিকতাবাদ' (Newtonian Relativity)।

যেহেতু আমরা সব রকম যান্ত্রিক পরীক্ষা পৃথিবী পৃষ্ঠের উপর অনুষ্ঠিত করে থাকি, আমরা সব সময় অনুমান করি যে পৃথিবী সংলগ্ন যে কোন নির্দেশক ফ্রেমই হচ্ছে জড়-ফ্রেম। কিন্তু এই সিদ্ধান্ত প্রকৃতপক্ষে ঠিক নয়। কারণ পৃথিবী আপন অক্ষ বেষ্টন করে ঘূর্ণনশীল। সেজন্য পৃথিবী পৃষ্ঠের সকল বস্তুর উপর একটা অপকেন্দ্রিক বল ক্রিয়া করে। অর্থাৎ পৃথিবী সংলগ্ন সব নির্দেশক ফ্রেমই ত্বরণশীল বেগে চলে, সমবেগে চলে না। সুতরাং এই নির্দেশক ফ্রেমগুলি জড়-ফ্রেম হতে পারে না। ব্যবহারিক ক্ষেত্রে অবশ্য

পৃথিবীকে একটা জড়-ফ্রেম বলে অনুমান করলে খুব বেশী ভুল হয় না। কারণ মহাশূন্যে পৃথিবীর সঞ্চরণ বেগ হচ্ছে 30 কিলোমিটার প্রতি সেকেণ্ডে। এই বেগ পৃথিবীর ঘূর্ণন বেগের তুলনায় অনেক বেশী। কিন্তু সূক্ষ্ম বিচার করলে পৃথিবী বা পৃথিবী সংলগ্ন কোন ফ্রেমকেই জড়-ফ্রেম বলা চলে না। নিউটন নিজে এ সম্বন্ধে অবহিত ছিলেন। তার মত ছিল যে আকাশে যে স্থির তারা-মণ্ডলীগুলি (Fixed Constellations) দেখা যায়, সেগুলির সংগে সংলগ্ন নির্দেশক ফ্রেমই হচ্ছে প্রকৃত জড়-ফ্রেম। কারণ তখনকার দিনে ধারণা ছিল যে সেগুলি মহাশূন্যে সম্পূর্ণ স্থিরাবস্থায় থাকে। কিন্তু পরবর্তী যুগে জানা যায় যে এই তথাকথিত স্থির তারা-মণ্ডলীগুলি প্রকৃতপক্ষে স্থির নয়। পৃথিবী থেকে বহুদূরে থাকার জন্য এগুলি আকাশে স্থিরাবস্থায় আছে বলে বোধ হয়। কিন্তু আধুনিক সূক্ষ্ম যন্ত্রসমূহের সাহায্যে পরীক্ষা করে এইসব তারকার গতি ধরা পড়েছে। আরও দেখা গেছে যে বিভিন্ন তারা-মণ্ডলীর আকৃতি খুব ধীরে পরিবর্তিত হয়। কয়েক শতাব্দী ব্যাপী নিরীক্ষণের ফলে এই অত্যল্প পরিবর্তন ধরা পড়েছে। অবশ্য এই পরিবর্তন এত ধীরে হয় যে প্রায় সমস্ত ব্যবহারিক প্রয়োজনে এই ফ্রেমগুলির সাপেক্ষে নিউটনের গতিসূত্রগুলিকে প্রায় নির্ভুল বলে মনে করে নিলে কোন ক্ষতি হয় না।

কিন্তু তথাপি প্রশ্ন থেকে যায় যে কোন নির্দেশক ফ্রেমকে প্রকৃত জড় ফ্রেম বলে ধরা যেতে পারে? এই প্রশ্নের মীমাংসা করতে গিয়ে বর্তমান শতাব্দীর গোড়ার দিকে অ্যাল্‌বার্ট আইনষ্টাইন (Albert Einstein) তাঁর নূতন আপেক্ষিকতাবাদ (Theory of Relativity) উদ্ভাবিত করেন।

## 8·2 : চরম নির্দেশক ফ্রেম ; ঈথার

ব্যতিচার (Interference), ব্যবর্তন (Diffraction), সমবর্তন (Polarization) প্রভৃতি পরীক্ষা থেকে প্রতীয়মান হয় যে আলোক এক প্রকার তরঙ্গ। উনবিংশ শতাব্দীর ষষ্ঠ দশক পর্যন্ত বিজ্ঞানীগণের ধারণা ছিল যে এই তরঙ্গ জলে উৎপন্ন তরঙ্গ বা শব্দ তরঙ্গের সমগোত্রীয়। একথা সুবিদিত যে শোষাক্ত তরঙ্গগুলির বিস্তারের জন্য মাধ্যমের প্রয়োজন হয়। সুতরাং আলোক তরঙ্গের বিস্তারের জন্যও একটা মাধ্যমের প্রয়োজন হয়, এইরূপ অনুমান করা স্বাভাবিক। যেহেতু আলোক তরঙ্গ সব সময় লম্ব প্রকৃতির (Transverse) হয়, এই তরঙ্গের বিস্তারের জন্য মাধ্যম কঠিন হওয়া প্রয়োজন। শুধু তাই নয়, যেহেতু আলোকের অনুদৈর্ঘ্য (Longi-

tudinal) তরঙ্গের অস্তিত্ব নাই, সুতরাং এই মাধ্যমের দৃঢ়তা (Rigidity) অসীম হওয়া প্রয়োজন। এই কাল্পনিক মাধ্যমের নাম দেওয়া হয় 'ঈথার' (Ether)। যেহেতু আলোক শূন্য স্থানের ভিতর দিয়েও পরিভ্রমণ করে, সুতরাং অনুমান করা হত যে ঈথার বিশ্বজগতের (Universe) মধ্যে সর্বত্র ব্যাপ্ত হয়ে থাকে ; তাছাড়া সমস্ত পদার্থের অভ্যন্তরেও ঈথার ব্যাপ্ত থাকে। এই সর্বব্যাপী ঈথারের ভৌত ধর্মাবলী কীরূপ হওয়া উচিত তা অনুমান করা যায়। যেহেতু তরঙ্গের বেগ হচ্ছে মাধ্যমের স্থিতিস্থাপকতা এবং ঘনত্বের অনুপাতের সমান এবং যেহেতু আলোক তরঙ্গ অতি উচ্চ বেগশীল, সুতরাং ঈথারের স্থিতিস্থাপকতা যে কোন পরিচিত কঠিন বস্তুর তুলনায় বহুগুণ বেশী এবং এর ঘনত্ব প্রায় নগণ্য হওয়া উচিত। এইরূপ প্রায় অসীম দৃঢ়তা, অতি উচ্চ স্থিতিস্থাপকতা এবং প্রায় নগণ্য ঘনত্ব সম্পন্ন কোন বাস্তব মাধ্যম কল্পনা করা কঠিন।

১৮৬৪ সালে প্রখ্যাত বৃটিশ বিজ্ঞানী ম্যাক্সওয়েল (James Clerk Maxwell) আলোকের তড়িৎচুম্বকীয় তত্ত্ব উদ্ভাবিত করেন। এই তত্ত্ব অনুসারে আলোক এক প্রকার তড়িৎচুম্বকীয় তরঙ্গ বলে কল্পনা করা হয়। অর্থাৎ আলোক তরঙ্গ হচ্ছে অতি দ্রুত কম্পনশীল তড়িৎক্ষেত্র এবং চৌম্বক ক্ষেত্রের সমন্বয়। এই দুই প্রকার ক্ষেত্রের দ্রুত কম্পন আলোকের বেগে এক স্থান থেকে অন্য স্থানে বিস্তার লাভ করে। হার্ৎস্ (Heinrich Hertz) নামক জার্মান বিজ্ঞানী গবেষণাগারে এইরূপ তড়িৎচুম্বকীয় তরঙ্গ উৎপন্ন করে ম্যাক্স-ওয়েলের তত্ত্বের সত্যতা প্রমাণিত করেন। পরবর্তী যুগে উদ্ভাবিত বেতার তরঙ্গ, টেলিভিসন, র‍্যাডার প্রভৃতি বিভিন্ন ক্ষেত্রে এইরূপ তরঙ্গের ব্যবহারিক প্রয়োগ সর্বজনবিদিত। ম্যাক্সওয়েলের তত্ত্ব উদ্ভাবনের পরে আলোক যে ঈথারে উৎপন্ন এক প্রকার স্থিতিস্থাপক তরঙ্গ, এই সনাতন মতবাদ পরিত্যক্ত হয় এবং আলোক তরঙ্গ প্রকৃতপক্ষে তড়িৎচুম্বকীয় তরঙ্গ, এই মতবাদ ক্রমশঃ বিজ্ঞানী সমাজে গৃহীত হয়।

ম্যাক্সওয়েল, হার্ৎস্ প্রমুখ বিজ্ঞানীগণের অবশ্য ধারণা ছিল যে আলোক এবং অনুরূপ তড়িৎচুম্বকীয় তরঙ্গের বিস্তারের জন্যও একটা মাধ্যমের প্রয়োজন হয়, এবং ঈথারই যে এই মাধ্যম এইরূপ বিশ্বাস তাঁদের মধ্যে প্রচলিত ছিল। তাছাড়া সে সময়ে অনেকের মনেই বিশ্বাস ছিল যে নিউটন যে আদর্শ জড়-ফ্রেম, অর্থাৎ চরম (Absolute) নির্দেশক ফ্রেমের কথা কল্পনা করেন, তার অস্তিত্ব এই সর্বব্যাপী ঈথারের মধ্যেই খুঁজে পাওয়া যেতে পারে। ঈথারের কল্পিত

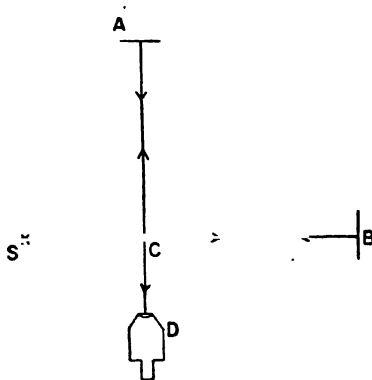
ধর্মাবলী এতই উদ্ভট যে সত্যসত্যই এইরূপ কোন মাধ্যমের অস্তিত্ব আছে কীনা তা পরীক্ষা করে দেখার প্রয়োজনীয়তা গত শতাব্দীর শেষের দিকে বিশেষ ভাবে উপলব্ধি করা হয়।

ঈথারের অস্তিত্ব সম্বন্ধীয় বহুবিধ পরীক্ষার মধ্যে সর্বাপেক্ষা গুরুত্বপূর্ণ হচ্ছে ১৮৮৭ সালে মাইকেল্‌সন এবং মর্লি (Michelson and Morley) নামক আমেরিকান বিজ্ঞানীদ্বয় কর্তৃক অনুষ্ঠিত নিম্নবর্ণিত পরীক্ষাটি।

## 8·3 : মাইকেল্‌সন এবং মর্লির পরীক্ষা

একথা সুবিদিত যে কোন স্থিতিস্থাপক মাধ্যমে উৎপন্ন তরঙ্গের বেগ নিরীক্ষকের সাপেক্ষে পরিমিত মাধ্যমের বেগের উপর নির্ভর করে। যথা প্রবহমান বায়ুর মধ্যে শব্দের বেগ নিশ্চল বায়ু মধ্যস্থ বেগ অপেক্ষা ভিন্ন হয়। এই তথ্যের উপর ভিত্তি করে মাইকেল্‌সন এবং মর্লি তাঁদের পরীক্ষা অনুষ্ঠিত করেন। পদার্থবিদ্যার ইতিহাসে যে সব যুগান্তরকারী পরীক্ষা অনুষ্ঠিত হয়েছে, এই পরীক্ষাটি সেগুলির মধ্যে অন্যতম।

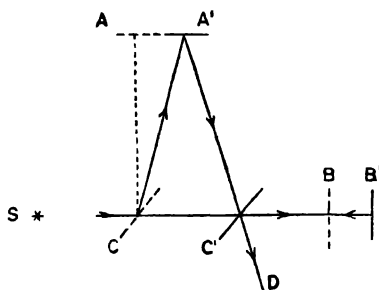
এই পরীক্ষায় মাইকেল্‌সন উদ্ভাবিত ব্যতিচারমাপক (Interferometer) যন্ত্র ব্যবহার করা হয়। (8·2) চিত্রে যন্ত্রটির একটি সরল নকৃশা

চিত্র 8·2

মাইকেল্‌সন-মর্লি'র পরীক্ষা ব্যবস্থা।

প্রদর্শিত হয়েছে। A এবং B দুটি সমতল দর্পণ। এদের উপরিতল থেকে আলোক প্রতিফলিত হয়। দর্পণ দুটির তল পরস্পরের সাপেক্ষে অভিলম্বে

স্থাপিত থাকে। একটি আলোক উৎস S থেকে একগুচ্ছ একবর্ণী আলোক রশ্মি SC সমান্তরাল তলদ্বয় বিশিষ্ট C কাঁচ প্লেটের উপর আপতিত হয়। C প্লেটটির এক পৃষ্ঠে হালকা ভাবে রুপার প্রলেপ দেওয়া থাকে। এই ধরনের প্লেটকে 'অর্ধ-প্রলিপ্ত প্লেট' বলা হয়। এই পৃষ্ঠের উপর আপতিত আলোক রশ্মি SC আংশিক ভাবে প্রতিফলিত হয় এবং আংশিক ভাবে নির্গত হয়। CA প্রতিফলিত রশ্মি A দর্পণের উপর লম্বভাবে আপতিত হয়ে বিপরীত দিকে ( অর্থাৎ AC রেখা ধরে ) প্রতিফলিত হয়। অপর-পক্ষে CB নির্গত রশ্মি B দর্পণের উপর লম্বভাবে আপতিত হয়ে বিপরীত দিকে ( অর্থাৎ BC রেখা ধরে ) প্রতিফলিত হয়। AC এবং BC রশ্মি দুটি C প্লেটের পশ্চাৎপৃষ্ঠে পরস্পরের সংগে মিলিত হয়ে ব্যতিচার (Interference) উৎপন্ন করে, যার ফলে কতকগুলি পর্যায়ক্রমে অবস্থিত উজ্জ্বল এবং আলোকহীন ডোরার (Fringe) সৃষ্টি হয়। এই ডোরাগুলি D অণুবীক্ষণ যন্ত্রের সাহায্যে নিরীক্ষণ করা যায়। প্রকৃত যন্ত্রে C এবং B এর অন্তর্বর্তী স্থানে C প্লেটের সমবেধ সম্পন্ন আর একটি কাঁচের প্লেট থাকে। (8·2) চিত্রে সেটি দেখান হয়নি।

যেহেতু সমগ্র যন্ত্রটি পৃথিবী পৃষ্ঠে অবস্থিত থাকে সুতরাং পৃথিবী যে বেগে মহাশূন্যে বিচরণ করে যন্ত্রটিও সেই একই বেগে মহাশূন্যের ভিতর

চিত্র 8·3

মাইকেল্‌সন-মর্লি'র পরীক্ষায় আলোকের পরিভ্রমণ পথ।

দিয়ে বিচরণ করে। মনে করা যাক যে যন্ত্রটির CB বাহু এই বেগের সমান্তরালে স্থাপিত আছে। যদি ঈথারের অস্তিত্ব স্বীকার করা যায় তাহলে পৃথিবী এবং পৃথিবী পৃষ্ঠের যাবতীয় বস্তুর সংগে যন্ত্রটিও ঈথারের মধ্য দিয়ে

$v$ বেগে অগ্রসর হয়। ফলে পৃথিবীর সাপেক্ষে বিপরীত দিকে $v$ বেগশীল ঈথার প্রবাহের সৃষ্টি হয়। একটি গতিশীল ট্রেনের দুই পাশে যে ধরনের বায়ু প্রবাহের সৃষ্টি হয়, এই ঈথার প্রবাহের উৎপত্তিও ঠিক তার অনুরূপ। যদি আলোককে ঈথার মাধ্যমে বিস্তারশীল তরঙ্গ বলে কল্পনা করা হয়, তাহলে অনুমান করা যেতে পারে যে ঈথার প্রবাহ আলোক তরঙ্গের বেগকে প্রভাবিত করবে। অর্থাৎ C থেকে B পর্যন্ত যাবার সময় যন্ত্রের সাপেক্ষে আলোকের বেগ $(c-v)$ হবে আর B থেকে C পর্যন্ত প্রত্যাবর্তনের পথে উক্ত বেগ $(c+v)$ হবে। এখানে $c$ হচ্ছে শূন্যে আলোকের বেগ। যদি CB বাহুর দৈর্ঘ্য হয় $L$ তাহলে C থেকে B পর্যন্ত গিয়ে আবার বিপরীত দিকে C পর্যন্ত ফিরে আসতে আলোকের সময় লাগবে ( 8·3 চিত্র দ্রষ্টব্য )

$$t_1 = \frac{L}{c-v} + \frac{L}{c+v} = 2L \cdot \frac{c}{c^2 - v^2}$$

সুতরাং C থেকে B দর্পণ পর্যন্ত গিয়ে প্রতিফলিত আলোক রশ্মি আবার C প্লেটে ফিরে আসতে যে পথ অতিক্রম করে তার দৈর্ঘ্য হচ্ছে

$$L_1 = ct_1 = 2L \frac{c^2}{c^2 - v^2} = \frac{2L}{1 - v^2/c^2}$$

$$\simeq 2L\,(1 + v^2/c^2) \qquad (8·6)$$

যেহেতু $v << c$।

অপরপক্ষে পৃথিবীর গতির জন্য C থেকে A দর্পণ পর্যন্ত যেতে আলোক রশ্মিকে প্রকৃতপক্ষে CA′ রেখা ধরে পরিভ্রমণ করতে হয় এবং প্রতিফলনের পরে C পর্যন্ত ফিরে আসবার সময় A′C′ রেখা ধরে পরিভ্রমণ করতে হয়। মনে করা যাক যে CA বাহুর দৈর্ঘ্য CB বাহুর দৈর্ঘ্য $L$-এর সমান। এখন C থেকে A′ পর্যন্ত যেতে আলোকের $CA'/c$ সময় লাগে। এই সময়ে A দর্পণটির সরণ $AA' = v.CA'/c$ হয়। অতএব

$$CA'^2 = CA^2 + AA'^2 = L^2 + CA'^2 \frac{v^2}{c^2}$$

$$CA'^2(1 - v^2/c^2) = L^2$$

অর্থাৎ $CA' = \dfrac{L}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$

যেহেতু $CA' = A'C'$ অতএব C থেকে অগ্রসর হবার পর A দর্পণে

প্রতিফলিত আলোক রশ্মি C′ পর্যন্ত ফিরে আসতে যে পথ অতিক্রম করে তার দৈর্ঘ্য হয়

$$L_2 = CA' + A'C' = \frac{2L}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \approx 2L\left(1 + \frac{v^2}{2c^2}\right) \qquad (8\cdot7)$$

সুতরাং C থেকে B এবং A দর্পণদ্বয় পর্যন্ত পরিভ্রমণের পর প্রতিফলিত আলোক রশ্মি দুটি আবার যখন C বিন্দুতে ফিরে এসে পুনর্মিলিত হয়, তখন তাদের মোট অতিক্রান্ত পথের মধ্যে ব্যবধান হয়

$$L_1 - L_2 = Lv^2/c^2 \qquad (8\cdot8)$$

পৃথিবীর যদি কোন বেগ না থাকত তাহলে অবশ্য এই পথ-ব্যবধান থাকত না। সুতরাং পরীক্ষা অনুষ্ঠানের সময় পৃথিবীর গতি হঠাৎ স্তব্ধ হয়ে যায় বলে যদি কল্পনা করা যায় তাহলে হঠাৎ পথ-ব্যবধান পরিবর্তনের জন্য D অণুবীক্ষণের মধ্যে দৃষ্ট ব্যতিচার ডোরাগুলির কিছুটা সরণ ঘটবে। বাস্তবে অবশ্য এই রকম কিছু ঘটতে পারে না। কিন্তু যদি সমগ্র ব্যতিচারমাপক যন্ত্রটিকে 90° কোণে আবর্তিত করা যায়, তাহলে CA বাহুটি CB বাহুর স্থান অধিকার করবে এবং CB বাহু CA বাহুর সমান্তরালে অধিষ্ঠিত হবে। ফলে আলোক রশ্মি কর্তৃক CA অভিমুখে অতিক্রান্ত পথ এখন CB অভিমুখী পথ অপেক্ষা পূর্বের মত $Lv^2/c^2$ পরিমাণে দীর্ঘতর হবে। সুতরাং যন্ত্রটিকে 90° কোণে আবর্তন করানর ফলে দুই বাহু অভিমুখী রশ্মিদ্বয়ের মধ্যে পথ-ব্যবধান পরিবর্তিত হয়ে $2Lv^2/c^2$ হবে, যার ফলে ব্যতিচার ডোরাগুলির সরণ ঘটবে। যেহেতু পৃথিবীর বেগ $v = 30$ কিমি প্রতি সেকেণ্ডে, সুতরাং $v^2/c^2 = 10^{-8}$ হয়। মাইকেল্সন এবং মর্লির পরীক্ষায় ব্যতিচার যন্ত্রের বাহুগুলির কার্যকরী দৈর্ঘ্য ছিল 11 মিটার। অতএব উপরে নির্ণীত পথ-ব্যবধান পরিবর্তনের মান হয়

$$\frac{2Lv^2}{c^2} = 2 \times 11 \times 10^2 \times 10^{-8} = 2200 \text{ অ্যাংস্ট্রম}$$

এই পথ-ব্যবধান ব্যবহৃত আলোকের তরঙ্গদৈর্ঘ্যের প্রায় 2/5 ভাগ। এই পরিমাণ পথ-ব্যবধানের জন্য অণুবীক্ষণের মধ্যে দৃষ্ট ব্যতিচার ডোরাগুলির যে সরণ ঘটা উচিত মাইকেল্সন এবং মর্লির পরীক্ষায় তা সহজেই পরিমাপ করা সম্ভব ছিল। কিন্তু সকল রকম সাবধানতা অবলম্বন করে পরীক্ষা অনুষ্ঠিত করেও তাঁরা ডোরাগুলির কোন সরণ দেখতে পাননি। বছরের বিভিন্ন সময়ে

পরীক্ষা করেও তাঁরা একই ফল পান। এই অপ্রত্যাশিত পরীক্ষালব্ধ ফল থেকে মাইকেল্‌সন এবং মর্লি সিদ্ধান্ত করেন যে পৃথিবী এবং ঈথারের মধ্যে কোন আপেক্ষিক বেগ নাই।

পরবর্তী যুগে টাউন্‌স্ (Townes) নামক আমেরিকান বিজ্ঞানী 'মেসার' (Maser) যন্ত্রের সাহায্যে আরও সূক্ষ্ম পরিমাপ করে মাইকেল্‌সন এবং মর্লির সিদ্ধান্ত যে নির্ভুল তা পুনরায় প্রমাণিত করেন।

মাইকেল্‌সন এবং মর্লির পরীক্ষার নেতিবাচক ফল থেকে প্রতীয়মান হয় যে 'ঈথার' নামক যে সর্বব্যাপী মাধ্যমের কল্পনা তৎকালে করা হত তার অস্তিত্বের কোন প্রমাণ পাওয়া যায় না। সুতরাং ঈথারের অস্তিত্ব নাই বলে ধরে নেওয়া যেতে পারে। অর্থাৎ যে চরম নির্দেশক ফ্রেমের কল্পনা বিজ্ঞানীগণ এতদিন করে এসেছিলেন তার কোন অস্তিত্ব নাই। এই পরীক্ষা থেকে আরও প্রমাণিত হয় যে আলোকের বেগ নিরীক্ষকের নির্দেশক ফ্রেমের উপর নির্ভর করে না। পরস্পরের সাপেক্ষে সমবেগ সম্পন্ন সব জড় নির্দেশক ফ্রেমেই আলোকের বেগ সমান হয়; এই বেগ হয় $c = 3 \times 10^{10}$ সেমি/সেকেণ্ডে। মাইকেল্‌সন তাঁদের পরীক্ষার নেতিবাচক ফলের একটা ব্যাখ্যা দেওয়ার চেষ্টা করেন। তিনি অনুমান করেন যে পৃথিবী তার দেহসংলগ্ন ঈথারকে নিজের গতিপথে টেনে নিয়ে যায়। ফলে পৃথিবী এবং ঈথারের কোন আপেক্ষিক গতি ধরা যায় না। এই মতবাদ ঠিক হলে উচ্চ পর্বতের শিখরে পৃথিবী এবং ঈথারের মধ্যে কিছুটা আপেক্ষিক গতি ধরা পড়তে পারে। সেজন্য তাঁরা উচ্চ পর্বতের উপর তাঁদের পরীক্ষাটি পুনরনুষ্ঠিত করেন। কিন্তু এক্ষেত্রেও তাঁরা ব্যতিচার ডোরার কোন সরণ দেখতে পাননি।

## 8·4: লোরেন্‌ৎস্-ফিট্‌স্‌জেরাল্‌ড সংকোচন মতবাদ

ইতিপূর্বে দেখা গেছে যে নিউটনের গতিসূত্রগুলি নিউটনীয় আপেক্ষিকতাবাদ মেনে চলে। অপরপক্ষে লোরেন্‌ৎস্ (Lorentz) নামক ডাচ্ বিজ্ঞানী প্রমাণ করেন যে ম্যাক্‌সওয়েলের তড়িৎচুম্বকীয় তত্ত্বের সূত্রগুলি গ্যালিলেওর রূপান্তর সমীকরণসমূহ (8·1) এবং (8·2) মেনে চলে না। এই সূত্রগুলি যদি কোন বিশেষ নির্দেশক ফ্রেমে সত্য বলে মেনে নেওয়া যায়, তাহলে উক্ত ফ্রেমের সাপেক্ষে সমবেগে গতিশীল অন্য এক নির্দেশক ফ্রেমে গ্যালিলেওর রূপান্তর সমীকরণ অনুসারে রূপান্তরিত করলে সূত্রগুলি পরিবর্তিত হয়ে যায়। অর্থাৎ ম্যাক্‌সওয়েলের সূত্রগুলি নিউটনের আপেক্ষিকতাবাদ মেনে

চলে না। যে নির্দেশক ফ্রেমে ম্যাক্সওয়েলের সূত্রগুলি সঠিক বলে ধরা যেতে পারে তাকে 'চরম নির্দেশক ফ্রেম' (Absolute Frame of Reference) আখ্যা দেওয়া যায়। অনেকের ধারণা ছিল যে ঈথারই হচ্ছে এই চরম নির্দেশক ফ্রেম। কিন্তু মাইকেল্সন-মর্লির পরীক্ষার পর ঈথারের অস্তিত্ব আর মেনে নেওয়া সম্ভব ছিল না। তা সত্ত্বেও লোরেন্ৎস্ এবং ফিট্স্জেরাল্ড (Lorentz and Fitzgerald) নামক বিজ্ঞানীদ্বয় একটি নূতন মতবাদ উদ্ভাবিত করেন যার দ্বারা ঈথারের অস্তিত্ব মেনে নিয়েও তাঁরা মাইকেল্সন-মর্লির পরীক্ষার নেতিবাচক ফল ব্যাখ্যা করতে সমর্থ হন।

তাঁদের মতবাদ অনুসারে ঈথারের সাপেক্ষে গতিশীল সকল বস্তুর দৈর্ঘ্য তাদের গতির অভিমুখে কিছু পরিমাণ সংকুচিত হয়ে যায়। যদি কোন বস্তুর স্থির অবস্থায় দৈর্ঘ্য হয় $l_0$, তাহলে সেটি যখন তার দৈর্ঘ্যের সমান্তরালে $v$ বেগে গতিশীল হয়, তখন দৈর্ঘ্য হয়ে যায়

$$l = l_0 \sqrt{1-\beta^2} \qquad (8.9)$$

এখানে $\beta = v/c$ ধরা হয়েছে। এই মতবাদকে বলা হয় লোরেন্ৎস্-ফিট্স্জেরাল্ড সংকোচন (Lorentz Fitzgerald Contraction) মতবাদ। এই মতবাদ অনুসারে মাইকেল্সন-মর্লির পরীক্ষায় ব্যতিচারমাপক যন্ত্রের যে বাহুটি পৃথিবীর গতির সমান্তরালে স্থাপিত থাকে (8.3 চিত্রে CB বাহু) সেটি পৃথিবীর বেগের জন্য সংকুচিত হয়ে যায়, যার ফলে এর দৈর্ঘ্য $L\sqrt{1-\beta^2}$ হয়ে যায়। ফলে সমীকরণ (8.6) অনুযায়ী CB অভিমুখে আলোক রশ্মি কর্তৃক অনুসৃত পথের দৈর্ঘ্য হয়ে যায়

$$L'_1 = \frac{2L\sqrt{1-v^2/c^2}}{1-v^2/c^2} = \frac{2L}{\sqrt{1-v^2/c^2}}$$

সমীকরণ (8.7) থেকে দেখা যায় যে এই পথ-দৈর্ঘ্য এবং এর অভিলম্ব অভিমুখী পথ-দৈর্ঘ্য $L_2$ পরস্পরের সমান হয়। অর্থাৎ দুটি পথের মধ্যে আর কোন ব্যবধান থাকে না। ফলে 90° কোণে আবর্তনের পরেও ব্যতিচার ডোরাগুলির কোন সরণ হয় না।

লোরেন্ৎস্-ফিট্স্জেরাল্ড সংকোচন তত্ত্বের সাহায্যে ঈথার মতবাদ সাময়িক ভাবে রক্ষা করা সম্ভব হয়। কিন্তু আইনষ্টাইন (Albert Einstein) ঈথার সম্পর্কীয় যাবতীয় পরীক্ষার ফল সূক্ষ্মভাবে বিচার করে দেখান যে লোরেন্ৎস্-ফিট্স্জেরাল্ড প্রস্তাবিত সংকোচন বস্তুতঃ একটি মৌলিক

প্রাকৃতিক সূত্রের ক্রিয়ার ফলে সংঘটিত হয়। একে একটা মৌলিক মতবাদ বলে মনে করা যায় না।

## ৪· 5 : আইনষ্টাইনের বিশেষ আপেক্ষিকতাবাদ

পূর্ব অনুচ্ছেদে দেখা গেছে যে ম্যাক্সওয়েলের তড়িৎচুম্বকীয় তত্ত্বের সূত্রগুলি নিউটনীয় আপেক্ষিকতাবাদ মেনে চলে না। অপর পক্ষে সনাতন বলবিদ্যা সূত্রগুলি উক্ত আপেক্ষিকতাবাদ মেনে চলে। পদার্থবিদ্যার এই দুই বিভাগের মৌলিক সূত্রগুলির পরস্পর বিরোধিতা নিরসন করতে তৎকালীন বিজ্ঞানীদের সামনে দুটি বিকল্প পথ খোলা ছিল ঃ

(ক) বলবিদ্যা সংক্রান্ত এবং তড়িৎচুম্বকীয় সংঘটনসমূহ, উভয় ক্ষেত্রেই আপেক্ষিকতাবাদ প্রযোজ্য। কিন্তু ম্যাক্সওয়েল উদ্ভাবিত সূত্রগুলি তড়িৎ-চুম্বকীয় ঘটনাবলীর সঠিক অভিব্যক্তি নয়।

(খ) বলবিদ্যা সংক্রান্ত এবং তড়িৎচুম্বকীয় সংঘটনসমূহ, উভয় ক্ষেত্রেই আপেক্ষিকতাবাদ প্রযোজ্য। কিন্তু নিউটন উদ্ভাবিত বলবিদ্যার সূত্রগুলির পরিবর্তন প্রয়োজন।

আইনষ্টাইন তাঁর অসাধারণ মনীষা বলে স্পষ্ট বুঝতে পারেন যে পদার্থ-বিদ্যার উপরে আলোচিত সংকট নিরসন করতে হলে দ্বিতীয় পথটিই অবলম্বন করতে হবে। অবশ্য এর জন্য নিউটনীয় আপেক্ষিকতাবাদের পরিবর্তে নূতন আপেক্ষিকতাবাদের প্রয়োজন।

আইনষ্টাইন প্রস্তাব করেন যে মাইকেল্‌সন-মর্লির পরীক্ষার সিদ্ধান্ত অনুযায়ী আলোকের বেগ সব জড়-ফ্রেমে সমান এটি একটি মৌলিক তথ্য হিসাবে মেনে নিতে হবে। তাহলে 'পরস্পরের সংগে সমবেগে গতিশীল বিভিন্ন জড়-ফ্রেমে পরিমিত যে কোন বেগ ভিন্ন হবে'—নিউটনীয় আপেক্ষিকতাবাদের এই সিদ্ধান্ত পরিত্যাগ করতে হয়। কারণ স্পষ্টতঃ আলোকের ক্ষেত্রে এই সিদ্ধান্ত প্রযোজ্য নয়। সে সময়ে এটা একটা অত্যন্ত দুঃসাহসিক মতবাদ ছিল। কারণ নিউটনের গতি সূত্রগুলি দুইশত বৎসরের অধিক কাল ধরে সমগ্র সনাতন বলবিদ্যার মৌলিক ভিত্তি বলে গৃহীত হয়েছিল। কাজেই এগুলিকে পরিত্যাগ করার অর্থ হচ্ছে বলবিদ্যার ক্ষেত্রে একটা বৈপ্লবিক পরিবর্তন সাধন।

১৯০৫ সালে আইনষ্টাইন তাঁর নূতন আপেক্ষিকতাবাদ প্রকাশিত করেন। তাঁর এই তত্ত্ব 'বিশেষ আপেক্ষিকতাবাদ' (Special Theory of

Relativity) নামে খ্যাত। দুটি অনুমানের ভিত্তিতে তিনি তাঁর তত্ত্ব উদ্ভাবিত করেন। এই অনুমান দুটি হচ্ছে ঃ

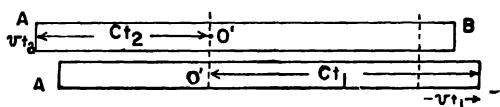
(ক) পরস্পরের সাপেক্ষে সমবেগ সম্পন্ন সকল জড় নির্দেশক ফ্রেমে সমস্ত ভৌত সূত্রই সমরূপী হবে।

(খ) যে কোন জড় নির্দেশক ফ্রেমে অবস্থিত নিরীক্ষক কর্তৃক পরিমিত আলোকের বেগ সমান হবে। অর্থাৎ নিরীক্ষকের বেগের উপর আলোকের বেগ নির্ভর করে না। আলোক উৎসের বেগের উপরও আলোকের বেগ নির্ভর করে না।

আপাতদৃষ্টিতে আইনষ্টাইনের প্রথম অনুমানটি ইতিপূর্বে আলোচিত নিউটনীয় আপেক্ষিকতাবাদের অনুরূপ বলে বোধ হলেও এদের মধ্যে মৌলিক পার্থক্য আছে। নিউটন এমন একটি আদর্শ চরম নির্দেশক ফ্রেমের কল্পনা করেন, যার মধ্যে তাঁর গতিসূত্রগুলি সঠিক ভাবে প্রযোজ্য। ফলে এই ফ্রেমের সাপেক্ষে সমবেগে গতিশীল যে কোন নির্দেশক ফ্রেমেও এই সূত্রগুলি প্রযোজ্য। মাইকেল্‌সন-মর্লির পরীক্ষার পর চরম নির্দেশক ফ্রেমের কল্পনা পরিত্যক্ত হয়। সুতরাং কোন চরম নির্দেশক ফ্রেমের কথা উল্লেখ না করে আইনষ্টাইন শুধু পরস্পরের সাপেক্ষে সমবেগে গতিশীল ফ্রেমগুলির কথাই বিবেচনা করেন। তাছাড়া নিউটনের আপেক্ষিকতাবাদে শুধু বলবিদ্যার সূত্রগুলি বিভিন্ন জড়-ফ্রেমে সমরূপী হবে, এই কথা বলা হয়। আইনষ্টাইন আরও একধাপ এগিয়ে গিয়ে বললেন যে শুধু বলবিদ্যার সূত্র নয়, তড়িৎচুম্বকীয় সূত্রগুলি সহ অন্যান্য ভৌত সূত্রসমূহও সকল জড়-ফ্রেমে সমরূপী হবে।

আইনষ্টাইনের দ্বিতীয় অনুমান মাইকেল্‌সন-মর্লির পরীক্ষার ফলের ভিত্তিতে প্রতিষ্ঠিত। সুতরাং এই অনুমানের সত্যতা সম্বন্ধে সন্দেহের কোন অবকাশ নাই। এই অনুমানের সত্যতা মেনে নিলে গ্যালিলেওর রূপান্তর সমীকরণগুলি ( সমীকরণ ৪·১ এবং ৪·২ ) পরিত্যাগ করা ভিন্ন অন্য উপায় নাই, এ কথা পূর্বেই উল্লেখ করা হয়েছে। সুতরাং এক জড়-ফ্রেম থেকে অন্য জড়-ফ্রেমে রূপান্তর করার জন্য নূতন ধরনের রূপান্তর সমীকরণ প্রয়োজন। আইনষ্টাইন প্রমাণ করেন যে তাঁর দ্বিতীয় অনুমানের সংগে খাপ খায় এইরূপ রূপান্তর সমীকরণ প্রতিপন্ন করতে হলে ধরে নিতে হবে যে বিভিন্ন জড়-ফ্রেমে সময়ের পরিমাপ ভিন্ন হয়। যদি কোন নিরীক্ষক তাঁর সাপেক্ষে গতিশীল একটি ঘড়ির সাহায্যে কিছুক্ষণ পরপর সময়ের পরিমাপ করেন, তাহলে তিনি দেখবেন যে এই পরিমিত সময়গুলি তাঁর সাপেক্ষে স্থির আর একটি ঘড়ির দ্বারা

পরিমিত সময়ের মান থেকে ভিন্ন হবে। সুতরাং নিউটনীয় আপেক্ষিকতাবাদে দুটি জড়-ফ্রেমে সময়ের মাপ যে সমান ধরে নেওয়া হয় (সমীকরণ $8{\cdot}1d$ দ্রষ্টব্য), তা ঠিক হতে পারে না। অর্থাৎ পরপর দুটি ঘটনার মধ্যে অতিবাহিত সময়ের মান পরস্পরের সাপেক্ষে সমবেগে গতিশীল দুজন নিরীক্ষকের কাছে পৃথক বলে বোধ হবে। এই যুক্তি অনুসারে দুটি ঘটনার সমকালীনত্বও নির্দেশক ফ্রেমের উপর নির্ভরশীল হবে। কোন একটি বিশেষ নির্দেশক ফ্রেমে অবস্থিত নিরীক্ষকের কাছে দুটি ঘটনা সমকালীন বলে প্রতীয়মান হলেও, প্রথমটির সাপেক্ষে সমবেগ সম্পন্ন আর এক নির্দেশক ফ্রেমে অবস্থিত নিরীক্ষকের কাছে ঘটনাগুলি সমকালীন নাও মনে হতে পারে।

উদাহরণস্বরূপ মনে করা যাক $v$ বেগে ভ্রাম্যমাণ $2l$ দৈর্ঘ্যের একটি রেলগাড়ীর ঠিক মধ্যস্থল থেকে গাড়ীর সামনের এবং পিছনের দিক লক্ষ্য করে ঠিক একই মুহূর্তে দুটি আলোক সংকেত পাঠান হয়। রেলগাড়ীর মধ্যে অবস্থিত নিরীক্ষকের বোধ হবে যে আলোক সংকেত দুটি ঠিক একই সময়ে গাড়ীর সামনের এবং পিছনের প্রান্তে উপস্থিত হয়। এই নিরীক্ষক কর্তৃক গাড়ীর কেন্দ্রস্থল থেকে আলোক সংকেত দুটির দুই প্রান্তে পৌঁছবার পরিমিত সময় $l/c$ হবে; $c$ হচ্ছে আলোকের বেগ। অপরপক্ষে রেল লাইনের ধারে দণ্ডায়মান নিরীক্ষকের মনে হবে যে আলোক সংকেত গাড়ীর দুই প্রান্তে বিভিন্ন

চিত্র 8·4

সমকালীনত্বের আপেক্ষিকতা বোধ।

সময়ে উপস্থিত হয়। আইনষ্টাইনের অনুমান অনুযায়ী দ্বিতীয় নিরীক্ষকের সাপেক্ষেও আলোকের বেগ $c$ হবে। যেহেতু গাড়ীটি সামনের দিকে এগিয়ে চলেছে, আলোক সংকেত এর পিছনের প্রান্তে একটু আগে পৌঁছবে, আর সামনের প্রান্তে একটু পরে পৌঁছবে। যদি সামনে এবং পিছনে পৌঁছতে

আলোক সংকেতের সময় লাগে যথাক্রমে $t_1$ এবং $t_2$ তাহলে আমরা পাই ( 8·4 চিত্র দ্রষ্টব্য )

$$ct_1 = l + vt_1$$
$$ct_2 = l - vt_2$$

অর্থাৎ $t_1 = l/(c-v)$ এবং $t_2 = l/(c+v)$। সুতরাং গাড়ীর মধ্যে অবস্থিত নিরীক্ষকের কাছে যে দুটি ঘটনা সমকালীন বলে বোধ হয়, লাইনের ধারে দণ্ডায়মান নিরীক্ষকের কাছে সেই একই ঘটনা দুটি বিভিন্ন সময়ে ঘটছে বলে বোধ হয়। অর্থাৎ সমকালীনত্ব কথাটি সম্পূর্ণ আপেক্ষিক এবং সময়ের পরিমাপও আপেক্ষিক।

আইনষ্টাইনের আপেক্ষিকতাবাদ উদ্ভাবনের কিছুদিন আগে লোরেন্‌ৎস্ দেখিয়েছিলেন যে ম্যাক্‌সওয়েলের তড়িৎচুম্বকীয় তত্ত্বের সূত্রগুলি গ্যালিলেওর রূপান্তর সমীকরণের পরিবর্তে এক নূতন ধরনের রূপান্তর সমীকরণ মেনে চলে। এই সমীকরণগুলিকে 'লোরেন্‌ৎস্ রূপান্তর সমীকরণ' (Lorentz Transformation Equation) বলা হয়। আইনষ্টাইন প্রমাণ করেন যে তাঁর অনুমান দুটির ভিত্তিতে উদ্ভাবিত নূতন আপেক্ষিকতাবাদে বিভিন্ন জড়-ফ্রেমের মধ্যে রূপান্তরণের জন্য লোরেন্‌ৎস্ রূপান্তর সমীকরণগুলি ব্যবহার করা প্রয়োজন।

## 8·6 : লোরেন্‌ৎস্ রূপান্তর সমীকরণ

এই রূপান্তর সমীকরণগুলি বিভিন্ন পদ্ধতিতে নির্ণয় করা যায়। মনে করা যাক S এবং S′ দুটি নির্দেশক ফ্রেম আছে। S′ ফ্রেমের $(x', y', z')$ স্থানাংক অক্ষগুলি S ফ্রেমের $(x, y, z)$ স্থানাংক অক্ষগুলির সাপেক্ষে $v$ সমবেগে $x$-অভিমুখে গতিশীল। যদি S ফ্রেমে অবস্থিত নিরীক্ষক তাঁর ফ্রেমে $(x, y, z)$ বিন্দুতে একটি ঘটনা $t$ সময়ে ঘটতে দেখেন, তাহলে সেই একই ঘটনা অন্য নিরীক্ষক S′ ফ্রেমে $(x', y', z')$ বিন্দুতে $t'$ সময়ে ঘটতে দেখবেন। $t$ এবং $t'$ সময় দুটি পরস্পরের সমান নাও হতে পারে।

মনে করা যাক যে S′ ফ্রেমের বিচরণকালে যখন $(x', y', z')$ স্থানাংক অক্ষগুলির O′ মূলবিন্দু (Origin) S ফ্রেমের স্থানাংক অক্ষগুলির O মূলবিন্দুর উপর সমাপতিত (Coincident) হয়, তখন দুই ফ্রেমের দুই নিরীক্ষক তাঁদের নিজ৷নিজ সময় মাপক ঘড়ি দুটি এমনভাবে মিলিয়ে নেন যে

দুটি ঘড়িই শূন্য সময় নির্দেশ করে, অর্থাৎ এই সময়ে $t = t' = 0$ হয়। ধরা যাক যে ঠিক এই সময়ে O বিন্দুতে অবস্থিত এক আলোক উৎস থেকে একটি আলোক সংকেত পাঠান হয়। যেহেতু আলোকের বেগ দুটি ফ্রেমেই সমান, দুই নিরীক্ষকেরই মনে হবে যে তাঁদের নিজ নিজ স্থানাংক মূলবিন্দু থেকে একটি গোলকাকৃতি (Spherical) আলোক তরঙ্গ $c$ বেগে বিস্তারিত হয়। S ফ্রেমের নিরীক্ষকের কাছে $t$ সেকেণ্ড পরে এই গোলকাকৃতি তরঙ্গের অবস্থান নির্ধারক সমীকরণ হবে

$$x^2 + y^2 + z^2 = c^2 t^2 \tag{8·10}$$

অপরপক্ষে S′ ফ্রেমের নিরীক্ষকের কাছে উক্ত তরঙ্গের অবস্থান নির্ধারক সমীকরণ হবে

$$x'^2 + y'^2 + z'^2 = c^2 t'^2 \tag{8·11}$$

মনে করা যাক যে S এবং S′ ফ্রেমের মধ্যে রূপান্তর সমীকরণগুলি হচ্ছে

$$x' = k(x - vt) \tag{8·12a}$$

$$y' = y \tag{8·12b}$$

$$z' = z \tag{8·12c}$$

$$t' = \alpha t + \gamma x \tag{8·12d}$$

এখানে $k$, $\alpha$ এবং $\gamma$ হচ্ছে তিনটি ধ্রুবক। এগুলির মান নির্ণয় করতে হবে।

(8·11) এবং (8·12) সমীকরণ থেকে পাওয়া যায়

$$k^2(x - vt)^2 + y^2 + z^2 = c^2(\alpha t + \gamma x)^2$$

সুতরাং

$$x^2(k^2 - \gamma^2 c^2) + y^2 + z^2 - 2xt(k^2 v + \alpha\gamma c^2) = t^2(\alpha^2 c^2 - k^2 v^2)$$

উপরের সমীকরণ এবং (8·10) সমীকরণের মধ্যে বিভিন্ন সমজাতীয় পদের গুণাংকগুলি (Coefficients) তুলনা করলে পাওয়া যায়

$$k^2 - \gamma^2 c^2 = 1 \tag{8·13a}$$

$$k^2 v + \alpha\gamma c^2 = 0 \tag{8·13b}$$

$$\alpha^2 c^2 - k^2 v^2 = c^2 \tag{8·13c}$$

সমীকরণ (8·13$a$) এবং (8·13$b$) থেকে পাওয়া যায়

$$\gamma^2 c^2 = k^2 - 1$$
$$\alpha^2 \gamma^2 c^4 = k^4 v^2$$

উপরের সমীকরণ দুটি থেকে ভাগ করে এবং (8·13$c$) সমীকরণ ব্যবহার করে পাওয়া যায়

$$\alpha^2 c^2 = \frac{k^4 v^2}{k^2 - 1} = k^2 v^2 + c^2$$
$$k^4 v^2 = k^4 v^2 - k^2 v^2 + k^2 c^2 - c^2$$

এর থেকে পাওয়া যায়

$$k^2 = \frac{c^2}{c^2 - v^2} = \frac{1}{1 - v^2/c^2}$$

আবার সমীকরণ (8·13$c$) থেকে পাওয়া যায়

$$(\alpha^2 - 1)c^2 = k^2 v^2 = \frac{v^2}{1 - v^2/c^2}$$
$$\alpha^2 = 1 + \frac{v^2/c^2}{1 - v^2/c^2} = \frac{1}{1 - v^2/c^2}$$

সুতরাং $$k = \alpha = \frac{1}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \tag{8·14}$$

আবার (8·13$b$) সমীকরণ থেকে পাওয়া যায়

$$\gamma = -\frac{k^2 v}{\alpha c^2} = -\frac{kv}{c^2} = -\frac{v/c^2}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \tag{8·15}$$

অতএব (8·12) সমীকরণগুলিকে লেখা যায়

$$x' = \frac{x - vt}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \tag{8·16a}$$

$$y' = y \tag{8·16b}$$

$$z' = z \tag{8·16c}$$

$$t' = \frac{t - vx/c^2}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \tag{8·16d}$$

এই সমীকরণগুলিকে বলা হয় 'লোরেন্‌ৎস্‌ রূপান্তর সমীকরণ'। অনুরূপে S′ ফ্রেম থেকে S ফ্রেমে রূপান্তর করবার জন্য প্রয়োজনীয় সমীকরণগুলি হচ্ছে

$$x=\frac{x'+vt'}{\sqrt{1-v^2/c^2}} \qquad (8{\cdot}17a)$$

$$y=y' \qquad (8{\cdot}17b)$$

$$z=z' \qquad (8{\cdot}17c)$$

$$t=\frac{t'+vx/c^2}{\sqrt{1-v^2/c^2}} \qquad (8{\cdot}17d)$$

যদি S ফ্রেমের সাপেক্ষে S′ ফ্রেমের বেগ $v$ আলোকের বেগের তুলনায় খুব কম হয়, অর্থাৎ যদি $v << c$ হয়, তাহলে (8·16) এবং (8·17) সমীকরণগুলি (8·1) এবং (8·2) রূপান্তর সমীকরণে, অর্থাৎ গ্যালিলেওর রূপান্তর সমীকরণে পরিণত হয়। সুতরাং সাধারণ ব্যবহারিক ক্ষেত্রে আইনষ্টাইনের বিশেষ আপেক্ষিকতাবাদ প্রয়োগ না করে নিউটনীয় আপেক্ষিকতাবাদ প্রয়োগ করা যায়।

## 8·7 : দৈর্ঘ্য পরিমাপের আপেক্ষিকতা

আইনষ্টাইনের বিশেষ আপেক্ষিকতাবাদ মেনে নিলে দৈর্ঘ্যের এবং সময়ের পরিমাপ সম্বন্ধে আমাদের ধারণার মৌলিক পরিবর্তন প্রয়োজন। মনে করা যাক যে আমরা ইস্পাত বা অনুরূপ যথেষ্ট দৃঢ়তা সম্পন্ন পদার্থের দ্বারা নির্মিত একটি দণ্ডের দৈর্ঘ্য মাপতে চাই। ধরা যাক যে দণ্ডটি S′ নির্দেশক ফ্রেমে স্থির অবস্থায় $x'$-অক্ষের সমান্তরালে স্থাপিত আছে। উক্ত ফ্রেমে অবস্থিত নিরীক্ষক যদি দণ্ডটির দুই প্রান্তের $x$-স্থানাংকদ্বয় $x'_1$ এবং $x'_2$ নির্ণয় করেন, তাহলে এই নিরীক্ষক কর্তৃক পরিমিত দণ্ডটির দৈর্ঘ্য হবে

$$L_0=x'_2-x'_1$$

অপরপক্ষে S যদি আর একটি নির্দেশক ফ্রেম হয়, যার সাপেক্ষে S ফ্রেম $v$ সমবেগে $x$-দিকে গতিশীল হয়, তাহলে S ফ্রেমের নিরীক্ষক একই মুহূর্তে দণ্ডটির দুই প্রান্তের $x$-স্থানাংকদ্বয়ের মান $x_1$ এবং $x_2$ পাবেন। সুতরাং S ফ্রেমের নিরীক্ষক, অর্থাৎ দণ্ডটির সাপেক্ষে গতিশীল নিরীক্ষক কর্তৃক দণ্ডটির পরিমিত দৈর্ঘ্য হবে

$$L=x_2-x_1$$

এখন সমীকরণ (8·16$a$) থেকে পাওয়া যায়

$$x'_1 = \frac{x_1 - vt}{\sqrt{1-v^2/c^2}} \text{ এবং } x'_2 = \frac{x_2 - vt}{\sqrt{1-v^2/c^2}}$$

সুতরাং $$L_0 = x'_2 - x'_1 = \frac{x_2 - x_1}{\sqrt{1-v^2/c^2}} = \frac{L}{\sqrt{1-v^2/c^2}}$$

অর্থাৎ $$L = L_0 \sqrt{1-v^2/c^2} \qquad (8·18)$$

সুতরাং দণ্ডটির দৈর্ঘ্যের সমান্তরালে গতিশীল নিরীক্ষক কর্তৃক নির্ণীত দৈর্ঘ্য $L$ স্থির নিরীক্ষক কর্তৃক নির্ণীত দৈর্ঘ্য $L_0$ অপেক্ষা কম হবে। দণ্ডটির দৈর্ঘ্যের এই সংকোচন লোরেন্‌ৎস্‌-ফিটস্‌জেরাল্ড সংকোচনের সমান ( সমীকরণ 8·9 দ্রষ্টব্য )। কিন্তু বিশেষ আপেক্ষিকতাবাদ থেকে প্রাপ্ত এই সংকোচন এবং লোরেন্‌ৎস্‌-ফিটস্‌জেরাল্ড সংকোচনের মধ্যে একটা মৌলিক পার্থক্য আছে। লোরেন্‌ৎস্‌ এবং ফিটস্‌জেরাল্ড যে সংকোচনের কথা ভেবেছিলেন তা ঈথারের সাপেক্ষে গতিশীল বস্তুর ক্ষেত্রে প্রযোজ্য। যেহেতু কল্পনা করা হত যে ঈথার চরম স্থিরাবস্থা সম্পন্ন নির্দেশক ফ্রেম, সুতরাং এই সংকোচনকে বলা যায় 'চরম সংকোচন'। অপরপক্ষে বিশেষ আপেক্ষিকতাবাদ থেকে প্রাপ্ত সংকোচন হচ্ছে দ্বিমুখী সংঘটন। অর্থাৎ S′ ফ্রেমে স্থাপিত দণ্ডটির দৈর্ঘ্য যেমন S ফ্রেমের নিরীক্ষকের কাছে সংকুচিত বলে বোধ হয়, ঠিক সেইরূপ S ফ্রেমে অবস্থিত একটি দণ্ডের দৈর্ঘ্যও S′ ফ্রেমের নিরীক্ষকের কাছে সংকুচিত বলে বোধ হবে।

## 8·8 সময় পরিমাপের আপেক্ষিকতা

মনে করা যাক যে S ফ্রেমে একটি ঘড়ি কোন নির্দিষ্ট বিন্দুতে অবস্থিত আছে। S ফ্রেমের নিরীক্ষক ঘড়িটির সাহায্যে কিছুক্ষণ পরপর সময় পরিমাপ করছেন। এই ভাবে পরপর দুবার পরিমিত সময় যদি হয় $t_1$ এবং $t_2$ তাহলে পরিমিত সময়ের ব্যবধান হবে

$$\Delta t = t_2 - t_1$$

অপরপক্ষে S′ ফ্রেমে অবস্থিত নিরীক্ষক তাঁর সাপেক্ষ সমবেগে গতিশীল S ফ্রেমের ঘড়িটির সাহায্যে উপরোক্ত সময় দুটি পরিমাপ করলে পাবেন ( সমীকরণ 8·16$d$ দ্রষ্টব্য )

$$t'_1 = \frac{t_1 - vx_1/c^2}{\sqrt{1-v^2/c^2}} \text{ এবং } t'_2 = \frac{t_2 - vx_2/c^2}{\sqrt{1-v^2/c^2}}$$

যেহেতু ঘড়িটি S ফ্রেমে একই বিন্দুতে স্থির অবস্থায় থাকে অতএব $x_1 = x_2$ হবে।

সুতরাং $S'$ ফ্রেমের নিরীক্ষক তাঁর সাপেক্ষে সমবেগে গতিশীল ঘড়ির সাহায্যে সময়ের ব্যবধান পরিমাপ করলে পাবেন

$$\Delta t' = t'_2 - t'_1 = \frac{t_2 - t_1}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} = \frac{\Delta t}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \qquad (8{\cdot}19)$$

যেহেতু $\sqrt{1 - v^2/c^2} < 1$ হয়, অতএব $\Delta t' > \Delta t$ হয়। সুতরাং যে কোন নিরীক্ষকের কাছে তাঁর সাপেক্ষে সমবেগে গতিশীল একটি ঘড়ি অপর একটি স্থির ঘড়ির তুলনায় অপেক্ষাকৃত মন্থর হারে চলে বলে বোধ হয়। অনুরূপে ঘড়িটি যদি $S'$ ফ্রেমে স্থির থাকে তাহলে S ফ্রেমের নিরীক্ষকের কাছে সেটি অপেক্ষাকৃত মন্থর হারে চলে বলে বোধ হয়। গতিশীল নিরীক্ষক কর্তৃক পরিমিত সময় ব্যবধানের এই দীর্ঘসূত্রতাকে বলা হয় 'আইনষ্টাইনের সময় দীর্ঘসূত্রতা' (Time Dilatation)। মহাজাগতিক রশ্মিতে (Cosmic Rays) প্রাপ্ত $\mu$-মেসন নামক এক প্রকার অস্থায়ী মৌলিক কণিকার বিঘটনের গড় 'জীবন কালের' (Mean Life of Disintegration) পরিমাপ দ্বারা সময়ের দীর্ঘসূত্রতা মতবাদের সত্যতা প্রমাণিত হয়েছে। এ সম্বন্ধে পরে (20·9) অনুচ্ছেদে বিশদভাবে আলোচনা করা হবে।

আইনষ্টাইনের বিশেষ আপেক্ষিকতাবাদ অনুযায়ী বিভিন্ন জড়-ফ্রেমে পরিমিত সময়ের এই পার্থক্য থেকে আর একটি গুরুত্বপূর্ণ সিদ্ধান্তে উপনীত হওয়া যায়। মনে করা যাক S ফ্রেমে $x_1$ এবং $x_2$ দুটি বিন্দুতে দুটি ঘটনা ঘটে যথাক্রমে $t_1$ এবং $t_2$ সময়ে। যদি $t_1 = t_2$ হয়, তাহলে S ফ্রেমে অবস্থিত নিরীক্ষকের কাছে ঘটনা দুটি সমকালীন (Simultaneous) বলে বোধ হবে। এখানে উল্লেখযোগ্য যে $x_1$ এবং $x_2$ পৃথক হওয়া প্রয়োজন, তা না হলে দুটি যে পৃথক ঘটনা তা বোঝা যাবে না। এখন S ফ্রেমের সাপেক্ষে সমবেগে গতিশীল $S'$ ফ্রেমে অবস্থিত নিরীক্ষকের কাছে যদি ঘটনা দুটি ঘটবার সময় $t'_1$ এবং $t'_2$ হয়, তাহলে ($8{\cdot}16d$) সমীকরণ অনুযায়ী লেখা যায়

$$t'_1 = \frac{t_1 - vx_1/c^2}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \qquad \text{এবং} \qquad t'_2 = \frac{t_2 - vx_2/c^2}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$$

যেহেতু $t_1 = t_2$, অতএব আমরা পাই

$$t'_1 - t'_2 = \frac{-v(x_1 - x_2)/c^2}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \qquad (8 \cdot 20)$$

যেহেতু $x_1$ এবং $x_2$ ভিন্ন হয়, অতএব S′ ফ্রেমের নিরীক্ষকের কাছে ঘটনা দুটি সমকালীন বলে বোধ হবে না। এর থেকে প্রতীয়মান হয় যে সমকালীনত্ব বোধ সম্পূর্ণ আপেক্ষিক।

এই প্রসঙ্গে দুটি ঘটনার ক্রমিকত্বের কথাও বিবেচনা করা যেতে পারে। S ফ্রেমে যদি দুটি ঘটনা এমন ভাবে ঘটে যে প্রথম ঘটনাটি $t_1$ সময়ে $x_1$ বিন্দুতে ঘটে এবং দ্বিতীয় ঘটনাটি এর পরে $t_2$ সময়ে $x_2$ বিন্দুতে ঘটে, তাহলে স্পষ্টতঃ $t_2 > t_1$ হয়। প্রশ্ন হতে পারে যে ঘটনা দুটির এই ক্রমিকত্ব S ফ্রেমের সাপেক্ষে সমবেগে গতিশীল S′ ফ্রেমেও বজায় থাকে কী না। মনে করা যাক যে S′ ফ্রেমের কোন নিরীক্ষক কর্তৃক ঘটনা দুটি ঘটবার পরিমিত সময় হচ্ছে $t'_1$ এবং $t'_2$ ; সমীকরণ $(8 \cdot 16d)$ অনুসারে লেখা যায়

$$t'_2 - t'_1 = \frac{(t_2 - t_1) - v/c^2(x_2 - x_1)}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$$

S′ ফ্রেমের নিরীক্ষকের কাছে ঘটনা দুটির ক্রমিকত্ব বজায় থাকতে হলে $t'_2 - t'_1 > 0$ হওয়া প্রয়োজন ; অর্থাৎ উপরের সমীকরণ অনুযায়ী লেখা যায়

$$t_2 - t_1 > v/c^2(x_2 - x_1)$$

অথবা $$\frac{x_2 - x_1}{t_2 - t_1} < c^2/v$$

এখন $(t'_2 - t'_1)$ সময়-ব্যবধান বাস্তব (Real) হবে যদি $v < c$ হয় ; অর্থাৎ যদি $c^2/v > c$ হয়। সুতরাং উপরের অসমতা (Inequality) সম্পর্কটি মান্য হবার শর্ত হচ্ছে

$$\frac{x_2 - x_1}{t_2 - t_1} < c$$

সুতরাং বিভিন্ন জড় ফ্রেমে দুটি পরপর ঘটনার ক্রমিকত্ব অপরিবর্তিত থাকবে যদি আলোকের বেগ অপেক্ষা দ্রুত বেগ সম্পন্ন কোন সংকেত পাঠান সম্ভবপর না হয়। আইনষ্টাইনের বিশেষ আপেক্ষিকতাবাদের অন্যতম গুরুত্বপূর্ণ সিদ্ধান্ত হচ্ছে যে আলোকের বেগ অপেক্ষা দ্রুততর বেগ উৎপন্ন করা কোন মতেই সম্ভব নয় ( নিম্নের আলোচনা দ্রষ্টব্য )। সুতরাং দুটি ঘটনার ক্রমিকত্ব কোন ক্রমেই পরিবর্তিত হতে পারে না। এখানে উল্লেখযোগ্য যে, এই সিদ্ধান্ত পরস্পরের সংগে কার্য-কারণ সম্বন্ধ যুক্ত (Causally Connected) দুটি ঘটনার ক্ষেত্রেই কেবল প্রযোজ্য। ঘটনা দুটির মধ্যে যদি কোনরূপ কার্য-কারণ সম্বন্ধ না থাকে তাহলে তাদের ক্রমিকত্ব অপরিবর্তিত নাও থাকতে পারে।

## 8·9 আইনষ্টাইনের বেগ সংযোজন উপপাদ্য

মনে করা যাক যে একটি কণিকা $S'$ নির্দেশক ফ্রেমে $x'$-অক্ষ অভিমুখে $w$ বেগে বিচরণ করে। এখন $S'$ ফ্রেমের সাপেক্ষে $v$ সমবেগে $x$-দিকে গতিশীল $S$ ফ্রেমে অবস্থিত কোন নিরীক্ষক কর্তৃক নির্ণীত কণিকাটির বেগ কত হবে তা বিবেচনা করা যাক। নিউটনীয় আপেক্ষিকতাবাদে এই প্রশ্নের উত্তর সহজেই পাওয়া যায়। $S$ ফ্রেমে নিরীক্ষক কর্তৃক পরিমিত কণিকাটির বেগ $u=v+w$ হবে। কিন্তু আইনষ্টাইনের বিশেষ আপেক্ষিকতাবাদ অনুযায়ী উপরের সম্পর্কটি পরিবর্তিত হয়ে যায়, বিশেষতঃ যখন দুটি ফ্রেমের আপেক্ষিক বেগ $v$ আলোকের বেগের কাছাকাছি হয়। যে কোন মুহূর্তে $S'$ ফ্রেমের নিরীক্ষক কর্তৃক নির্ণীত কণিকাটির অবস্থান $x'=wt'$ হবে। সুতরাং লোরেন্‌ৎস্ রূপান্তর সমীকরণ (18·16$a$) এবং (18·16$d$) থেকে পাওয়া যায়

$$\frac{x-vt}{\sqrt{1-v^2/c^2}}=w.\frac{t-vx/c^2}{\sqrt{1-v^2/c^2}}$$

সুতরাং
$$x=\frac{v+w}{1+vw/c^2}\cdot t$$

অতএব $S$ ফ্রেমের সাপেক্ষে কণিকাটির বেগ হয়

$$u=\frac{dx}{dt}=\frac{v+w}{1+vw/c^2} \qquad (8{\cdot}21)$$

(8·21) সমীকরণ থেকে সমদিষ্ট দুটি বেগের লব্ধি (Resultant) পাওয়া যায়। যদি $v$ এবং $w$ এই দুটি বেগই আলোকের বেগের তুলনায় খুব নিম্নমান সম্পন্ন হয়, তাহলে $vw/c^2 << 1$ হয় এবং লব্ধি বেগ $u=v+w$ হয়ে যায়। অর্থাৎ এক্ষেত্রে দুটি সমান্তরাল বেগের লব্ধি নির্ণয় করার সম্পর্কটি নিউটনীয় আপেক্ষিকতাবাদ অনুযায়ী প্রাপ্ত সম্পর্ক থেকে অভিন্ন হয়।

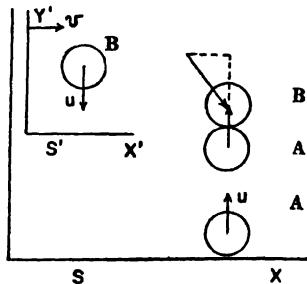
অপরপক্ষে যদি $w=c$ হয়, তাহলে আমরা পাই

$$u=\frac{v+c}{1+vc/c^2}=c \qquad (8\cdot22)$$

অর্থাৎ একাধিক সমান্তরাল বেগের লব্ধির মান আলোকের বেগ $c$ অপেক্ষা বেশী হতে পারে না। এমন কি যদি $v$ এবং $w$ দুটি উপাংশ (Component) বেগই $c$ এর সমান হয়, তাহলেও লব্ধি বেগের মান $u=c$ হবে। সুতরাং আইনষ্টাইনের বিশেষ আপেক্ষিকতাবাদের অন্যতম গুরুত্বপূর্ণ সিদ্ধান্ত হচ্ছে যে, আলোকের বেগ সব সময় সমান হয়, নিরীক্ষকের বা উৎসের বেগের উপর নির্ভর করে না। এখানে উল্লেখযোগ্য যে, এই সিদ্ধান্ত আইনষ্টাইনের তত্ত্বের মৌলিক অনুমান থেকে অভিন্ন।

## 8·10. বেগের সংগে বস্তুর ভর পরিবর্তন

সনাতন বলবিদ্যায় সকল বস্তুর ভর অপরিবর্তনীয় ধরে নেওয়া হয়; অর্থাৎ বস্তুর ভর হচ্ছে বেগ-নিরপেক্ষ। কিন্তু বিশেষ আপেক্ষিকতাবাদ অনুযায়ী

চিত্র 8·5

বিভিন্ন জড় ফ্রেম থেকে দৃষ্ট দুটি বস্তুর মধ্যে সংঘাতের চিত্ররূপ।

বস্তুর ভর বেগের উপর নির্ভরশীল হয়। বেগের উপর বস্তুর ভরের নির্ভরশীলতার গাণিতিক সূত্র নিম্নলিখিত উপায়ে নির্ণয় করা যায়।

মনে করা যাক S নির্দেশক ফ্রেমে একজন নিরীক্ষক ধনাত্মক $y$-অক্ষ অভিমুখে $u$ বেগে একটি গোলকাকৃতি স্থিতিস্থাপক বল A নিক্ষেপ করেন (8·5 চিত্র দ্রষ্টব্য)। এখন S ফ্রেমের সাপেক্ষে $v$ সমবেগে $x$-দিকে গতিশীল S′ নির্দেশক ফ্রেমের কথা বিবেচনা করা যাক। S′ ফ্রেমে অবস্থিত একজন নিরীক্ষক আর একটি স্থিতিস্থাপক গোলকাকৃতি বল B ঋণাত্মক $x$-অক্ষ অভিমুখে $u$ বেগে নিক্ষেপ করেন। এখানে মনে রাখতে হবে যে দুই ফ্রেমের নিরীক্ষক দুজন নিজ নিজ ফ্রেমে বলের বেগ পরিমাপ করেন। S′ ফ্রেমের $x$-অক্ষ অভিমুখী গতির ফলে বল দুটির মধ্যে স্থিতিস্থাপক সংঘাত (Elastic Collision) ঘটে। এই সংঘাত এমন ভাবে ঘটে যে ঠিক সংঘাত কালে বল দুটির কেন্দ্র সংযোজী সরলরেখাটি $y$-অক্ষের সমান্তরালে থাকে। বল দুটি মসৃণ এবং সম্পূর্ণ স্থিতিস্থাপক হওয়ার জন্য সংঘাতের ফলে তাদের বেগের $x$-উপাংশগুলির কোন পরিবর্তন ঘটে না।

এখন S ফ্রেমের নিরীক্ষকের সাপেক্ষে A বলটির বেগের $x$ এবং $y$ উপাংশদ্বয় যথাক্রমে শূন্য এবং $u$ হয়। স্পষ্টতঃ উক্ত নিরীক্ষকের সাপেক্ষে B বলটির বেগের $x$-উপাংশ হচ্ছে $v$ (8·5 চিত্র দ্রষ্টব্য) এবং $y$-উপাংশ হচ্ছে

$$w_{By}=\frac{dy}{dt}=\frac{dy}{dt'}\Big/\frac{dt}{dt'}$$

লোরেন্‌ৎস্ রূপান্তর সমীকরণ (8·17) প্রয়োগ করে আমরা পাই

$$w_{By}=\frac{dy'/dt'}{1/\sqrt{1-v^2/c^2}}=\frac{dy'}{dt'}\sqrt{1-v^2/c^2}$$

এখানে $dy'/dt'$ হচ্ছে S′ ফ্রেমের সাপেক্ষে B বলটির বেগের $y$-উপাংশ, অর্থাৎ $dy'/dt'=-u$ ; অতএব আমরা পাই

$$w_{By}=-u\sqrt{1-v^2/c^2}$$

সুতরাং S ফ্রেমের নিরীক্ষকের সাপেক্ষে A এবং B বল দুটির বেগের $x$ ও $y$ উপাংশগুলি লেখা যায় (8·5 চিত্র দ্রষ্টব্য):

$$w_{Ax}=0,\ w_{Ay}=u\ ;\ w_{Bx}=v,\ w_{By}=-u\sqrt{1-v^2/c^2} \tag{8·23}$$

স্পষ্টতঃ S ফ্রেমে A ও B বল দুটির লব্ধি বেগ হয়

$$w_A=u \text{ এবং } w_B=\sqrt{v^2+u^2(1-v^2/c^2)} \tag{8·23a}$$

অনুরূপে S′ ফ্রেমের নিরীক্ষকের সাপেক্ষে A এবং B বল দুটির বেগের $x$ ও $y$ উপাংশগুলি এবং এদের লব্ধি বেগ নির্ণয় করা যায়।

ধরা যাক যে বল দুটির পরিমিত ভর যে কোন একটি নির্দেশক ফ্রেমে পরস্পরের সমান হয়। এখন যদি বেগের সংগে ভর $m$ পরিবর্তন করে বলে ধরে নেওয়া যায়, তাহলে আমরা লিখতে পারি

$$m = m(u)$$

সংঘাতের পর দুটি নির্দেশক ফ্রেমেই বলগুলির বেগ পরিবর্তিত হয়ে যায়। যদি সংঘাতোত্তর বেগের উপাংশগুলিকে সংঘাতপূর্ব অনুরূপ উপাংশগুলির চিহ্নের উপরে মাত্রা-রেখা দ্বারা নির্দেশ করা যায়, তাহলে যেহেতু দুটি বলের বেগের $x$-উপাংশ অপরিবর্তিত থাকে, অতএব

$$\overline{w}_{Ax} = w_{Ax} = 0\ ;\ \overline{w}_{Bx} = w_{Bx} = v \qquad (8{\cdot}23b)$$

এবং $\overline{w}_{Ay} = \overline{u}\ ;\ \overline{w}_{By} = -\overline{u}\sqrt{1 - v^2/c^2}$

সুতরাং সংঘাতের পরে এদের লব্ধি বেগ হয়

$$\overline{w}_A = \overline{u}\ ;\ \overline{w}_B = \sqrt{v^2 + \overline{u}^2(1 - v^2/c^2)} \qquad (8{\cdot}23c)$$

সংঘাতের পূর্বে বল দুটির ভর লেখা যায়

$$m_A = m_A(u) \text{ এবং } m_B = m_B\{\sqrt{v^2 + u^2(1 - v^2/c^2)}\} \qquad (8{\cdot}24)$$

অনুরূপে সংঘাতের পরে বল দুটির ভর লেখা যায়

$$m_A' = m_A'(\overline{u}) \text{ এবং } m_B' = m_B'\{\sqrt{v^2 + \overline{u}^2(1 - v^2/c^2)}\} \qquad (8{\cdot}24a)$$

এখন S ফ্রেমে $x$ দিকে ভরবেগ সংরক্ষণ সূত্র প্রয়োগ করলে আমরা পাই

$$m_A . w_{Ax} + m_B . w_{Bx} = m_A' . \overline{w}_{Ax} + m'_B . \overline{w}_{Bx}$$

যেহেতু দুটি বলের বেগের $x$-উপাংশ অপরিবর্তিত থাকে, অতএব (8·23$b$) সমীকরণ ব্যবহার করে আমরা পাই

$$m_A . 0 + m_B . v = m'_A . 0 + m'_B . v$$

সুতরাং (8·24) ও (8·24$a$) সমীকরণ থেকে আমরা পাই

$$m_B\{\sqrt{v^2 + u^2(1 - v^2/c^2)}\} = m_B'\{\sqrt{v^2 + \overline{u}^2(1 - v^2/c^2)}\}$$

অতএব $$\bar{u}^2 = u^2$$

$$\bar{u} = \pm u$$

নিউটনীয় বলবিদ্যা অনুসারে $\bar{u} = -u$ হয়। যেহেতু আপেক্ষিকতাবাদ প্রসূত বলবিদ্যার সূত্রগুলি নিম্ন বেগের ক্ষেত্রে নিউটনীয় বলবিদ্যার সূত্রে পরিণত হয়, সুতরাং উপরের সমীকরণে $\bar{u} = -u$ হতে হবে। আবার S ফ্রেমে $y$-অক্ষের দিকে ভরবেগ সংরক্ষণ সূত্র প্রয়োগ করে পাওয়া যায়

$$m_A.w_{Ay} + m_B.w_{By} = m_A'.\bar{w}_{Ay} + m'_B.\bar{w}_{By}$$

এখানে $\bar{w}_{Ay} = \bar{u} = -u$ এবং $\bar{w}_{By} = -\bar{u}\sqrt{1 - v^2/c^2}$ $= u\sqrt{1 - v^2/c^2}$ হয়।

সুতরাং (8·24) ও (8·24$a$) সমীকরণ অনুযায়ী $m_A' = m_A$ হয়; আবার যেহেতু উপরের আলোচনা অনুযায়ী $m_B' = m_B$ হয়, অতএব আমরা পাই

$$m_A.u - m_B.u\sqrt{1 - v^2/c^2} = -m_A.u + m_B.u\sqrt{1 - v^2/c^2}$$

এর থেকে পাওয়া যায়

$$m_B\{\sqrt{v^2 + u^2(1 - v^2/c^2)}\} = \frac{m_A(u)}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$$

যেহেতু একই ফ্রেমে বল দুটির ভর সমান ধরা হয়েছে অতএব আমরা লিখতে পারি

$$m\{\sqrt{v^2 + u^2(1 - v^2/c^2)}\} = \frac{m(u)}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$$

এখন বলের নিক্ষেপ বেগ $u$ যদি কমাতে কমাতে ক্রমশঃ শূন্য করা হয়, তাহলে উপরের সমীকরণ থেকে লেখা যায়

$$m(v) = \frac{m_0}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \qquad (8·25)$$

এখানে $m_0$ হচ্ছে স্থির অবস্থায় কোন বস্তুর (এক্ষেত্রে বলটির) ভর এবং $m(v)$ হচ্ছে $v$ বেগে গতিশীল অবস্থায় বস্তুটির ভর।

সমীকরণ (8·25) থেকে বেগের সংগে আপেক্ষিকতাবাদ অনুযায়ী প্রাপ্ত কোন বস্তুর ভর পরিবর্তন নির্ণয় করা যায়। তেজস্ক্রিয় পরমাণুর কেন্দ্রক থেকে নিঃসৃত উচ্চ বেগ সম্পন্ন ইলেকট্রন নিয়ে পরীক্ষা করে বুখারের (Bucherer) নামক বিজ্ঞানী এই সমীকরণের সত্যতা প্রমাণ করেন ( 13·2 অনুচ্ছেদ দ্রষ্টব্য )।

### 8·11 : ভর এবং শক্তির সমতুল্যতা

সমীকরণ (8·25) থেকে আপেক্ষিকতাবাদের আর একটি গুরুত্বপূর্ণ সিদ্ধান্ত প্রতীয়মান হয়। $v$ বেগে বিচরণশীল একটি বস্তুর ভর $m$ ধরা যাক। যদি বস্তুটির উপর $F$ বল ক্রিয়া করে, এবং উক্ত বলের ক্রিয়ায় বস্তুটির যদি $dx$ সরণ হয়, তাহলে এই সরণকালে বস্তুটির গতিশক্তি বৃদ্ধি পায়। এই বৃদ্ধির পরিমাণ হচ্ছে

$$dE = F dx$$

যেহেতু প্রযুক্ত বল $F$ হচ্ছে ভরবেগ পরিবর্তন হারের সমান, অতএব আমরা লিখতে পারি

$$F = \frac{d}{dt}(mv)$$

সুতরাং $$dE = \frac{d}{dt}(mv)\,dx = \frac{d}{dt}(mv)\frac{dx}{dt}\,dt$$

$$= v\,d(mv) = v^2 dm + mv\,dv$$

অতএব $$mv\,dv = dE - v^2 dm$$

যদি বস্তুটির স্থির ভর হয় $m_0$, তাহলে যেহেতু $m = m_0/\sqrt{1 - v^2/c^2}$, অতএব আমরা পাই

$$m^2(1 - v^2/c^2) = m_0^2$$

উপরের সমীকরণ অবকলন (Differentiate) করে পাওয়া যায়

$$2m\,dm(1 - v^2/c^2) - \frac{2m^2 v\,dv}{c^2} = 0$$

অথবা $$mv\,dv = (c^2 - v^2)dm$$

সুতরাং লেখা যায়

$$dE - v^2 dm = c^2 dm - v^2 dm$$

অতএব আমরা পাই

$$dE = c^2 dm$$

এর থেকে সমাকলন (Integrate) করে পাওয়া যায়

$$E = mc^2 = \frac{m_0 c^2}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \qquad (8{\cdot}26)$$

(8·26) সমীকরণ থেকে প্রতীয়মান হয় যে $v$ বেগে ভ্রাম্যমাণ কোন বস্তুর ভর যদি $m$ হয়, তাহলে এই ভর $mc^2$ পরিমাণ শক্তির সমতুল্য (Equivalent) হয়। অর্থাৎ যদি এই ভর সম্পূর্ণরূপে শক্তিতে রূপান্তরিত হয়, তাহলে $mc^2$ পরিমাণ শক্তি উৎপন্ন হবে। বস্তুটি যদি স্থির অবস্থায় থাকে, তাহলে এর স্থির-ভর $m_0$ শক্তিতে রূপান্তরিত হলে $m_0 c^2$ পরিমাণ স্থির-শক্তি উৎপন্ন হবে। ভর এবং শক্তির এই পারস্পরিক রূপান্তর কেন্দ্রক বিক্রিয়া (Nuclear Reaction), কেন্দ্রক বিভাজন (Nuclear Fission) প্রভৃতি ক্ষেত্রে অপরিসীম গুরুত্বপূর্ণ। ভরের রূপান্তরের ফলে উৎপন্ন শক্তির পরিমাণ অতি বিশাল। এক গ্রাম ভর সম্পূর্ণভাবে শক্তিতে রূপান্তরিত হলে $9 \times 10^{20}$ আর্গ বা $2{\cdot}5 \times 10^7$ কিলোওয়াট-ঘণ্টা শক্তি উৎপন্ন হয়। বর্তমানে কেন্দ্রক বিভাজন প্রক্রিয়ার সাহায্যে এই শক্তির ব্যবহারিক উৎপাদন সম্ভব হয়েছে। শক্তির এই নূতন উৎস আবিষ্কারের জন্য বর্তমান যুগকে 'পরমাণবিক যুগ' (Atomic Age) নামে অভিহিত করা হয়। এ সম্বন্ধে পরে বিশদ ভাবে আলোচনা করা হবে।

## 8·12 : আপেক্ষিকতাবাদ থেকে প্রাপ্ত কয়েকটি গুরুত্বপূর্ণ গাণিতিক সম্পর্ক

(8·11) অনুচ্ছেদে দেখা গেছে যে আপেক্ষিকতাবাদ অনুযায়ী প্রত্যেক বস্তুর ভর এবং শক্তি সমতুল্য। $m$ ভর সম্পন্ন বস্তুর মোট শক্তি $mc^2$ হয়। আবার বস্তুটির ভর $m$ তার বেগ $v$ এর উপর নির্ভরশীল। বেগশূন্য অবস্থায় ($v = 0$) বস্তুটির ভর যদি হয় $m_0$, তাহলে তার শক্তি $m_0 c^2$ হয়। সুতরাং বস্তুটির বেগ জনিত শক্তি, অর্থাৎ গতিশক্তি হয়

$$E_k = mc^2 - m_0 c^2 = m_0 c^2 \left\{ \frac{1}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} - 1 \right\} \qquad (8{\cdot}27)$$

সনাতন বলবিদ্যা থেকে প্রাপ্ত গতিশক্তি $\frac{1}{2} m_0 v^2$ এবং সমীকরণ (8·27) অর্থাৎ আপেক্ষিকতাবাদ থেকে প্রাপ্ত গতিশক্তির পরিমাণ ভিন্ন হয়। বস্তুটির

বেগ খুব উচ্চ হলে, অর্থাৎ আলোকের বেগ $c$ এর সংগে তুলনীয় হলে, তবেই এই দুই তত্ত্ব থেকে প্রাপ্ত গতিশক্তির পার্থক্য ধরা পড়ে। যদি বস্তুটির বেগ $v << c$ হয়, তাহলে সমীকরণ (8·27) থেকে পাওয়া যায়

$$E_k = m_0 c^2[(1 - v^2/c^2)^{-\frac{1}{2}} - 1]$$
$$= m_0 c^2\left[1 + \frac{1}{2}\frac{v^2}{c^2} - 1\right] = \tfrac{1}{2} m_0 v^2$$

অর্থাৎ এক্ষেত্রে আপেক্ষিকতাবাদী বলবিদ্যা থেকে প্রাপ্ত গতিশক্তি নিউটনীয় বলবিদ্যা থেকে প্রাপ্ত গতিশক্তির সমান হয়।

আপেক্ষিকতাবাদ অনুযায়ী $v$ বেগে ভ্রাম্যমাণ একটি বস্তুর ভরবেগ হয়

$$p = mv$$

এখানে $m$ হচ্ছে ভ্রাম্যমাণ বস্তুর ভর, যা বেগের উপর নির্ভরশীল। সমীকরণ (8·25) থেকে লেখা যায়

$$p = \frac{m_0 v}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \qquad (8·28)$$

আবার $$p^2c^2 + m_0^2c^4 = \frac{m_0^2 v^2 c^2}{1 - v^2/c^2} + m_0^2 c^4$$
$$= m_0^2 c^2\left[\frac{v^2}{1 - v/c^2} + c^2\right]$$
$$= \frac{m_0^2 c^4}{1 - v^2/c^2} = m^2 c^4$$

যেহেতু $E = mc^2$ হচ্ছে বস্তুটির মোট শক্তি, সুতরাং উপরের সমীকরণ থেকে আমরা পাই

$$E^2 = p^2c^2 + m_0^2 c^4 \qquad (8·29)$$

## 8·13 : আইনষ্টাইনের সাধারণ আপেক্ষিকতাবাদ

আইনষ্টাইনের বিশেষ আপেক্ষিকতাবাদ পরস্পরের সংগে সমবেগ সম্পন্ন নির্দেশক ফ্রেমের ক্ষেত্রে, অর্থাৎ জড় ফ্রেমের ক্ষেত্রে প্রযোজ্য। পরে আইনষ্টাইন আর একটি তত্ত্ব প্রকাশিত করেন, যা ত্বরণশীল নির্দেশক ফ্রেমের (Accelerated Frame) ক্ষেত্রেও প্রযোজ্য। এই নূতন তত্ত্বকে বলা হয়

সাধারণ আপেক্ষিকতাবাদ (General Theory of Relativity)। সাধারণ আপেক্ষিকতাবাদ থেকে আইনষ্টাইন মহাকর্ষ সম্বন্ধে এক নূতন মতবাদ উদ্ভাবিত করেন। এই নূতন তত্ত্ব অত্যন্ত জটিল। এই তত্ত্বের কয়েকটি গুরুত্বপূর্ণ সিদ্ধান্ত, যথা সৌরমণ্ডলে বুধগ্রহের কক্ষপথের অয়নচলন (Precession) গতি ( প্রতি শতাব্দীতে প্রায় 42″ ), সূর্যের অভিকর্ষের প্রভাবে আলোক রশ্মির সামান্য বিচ্যুতি এবং বিভিন্ন পার্থিব উৎস থেকে উৎপন্ন বর্ণালীরেখার তরঙ্গদৈর্ঘ্যের তুলনায় অনুরূপ সৌর বর্ণালীরেখার তরঙ্গদৈর্ঘ্যের সামান্য পার্থক্য পরীক্ষা দ্বারা সত্য বলে প্রমাণিত হয়েছে। উল্লেখযোগ্য যে 4000 অ্যাং তরঙ্গদৈর্ঘ্য সম্পন্ন বর্ণালীরেখার ক্ষেত্রে এই শেষোক্ত পার্থক্য প্রায় 0·008 অ্যাং পাওয়া যায়।

পরিচ্ছেদ 9

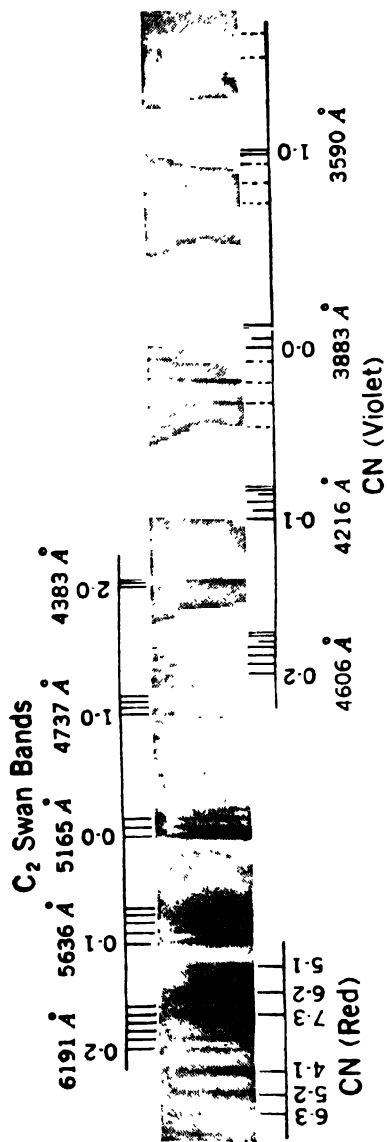
# আণবিক বর্ণালী

## 9·1. সূচনা

তৃতীয় ও পঞ্চম পরিচ্ছেদে মোক্ষণ নল থেকে নিঃসৃত বর্ণালীর প্রকৃতি সম্বন্ধে আলোচনা করা হয়েছে। এই বর্ণালীতে কতকগুলি অবচ্ছিন্ন রেখা (Discrete Lines) দেখা যায়। সেজন্য এইরূপ বর্ণালীকে বলা হয় 'রেখা-বর্ণালী' (Line Spectrum)। রেখা-বর্ণালীর উৎপত্তি হয় বিভিন্ন মৌলের পরমাণু থেকে। বোর-সমারফেল্ড তত্ত্বের সাহায্যে এবং পরবর্তী যুগে কোয়ানটাম বলবিদ্যার সাহায্যে রেখা-বর্ণালীর উৎপত্তির কারণ ব্যাখ্যা করা সম্ভবপর হয়। এ সম্বন্ধে ইতিপূর্বে বিশদভাবে আলোচনা করা হয়েছে।

বিশেষ বিশেষ ক্ষেত্রে মোক্ষণ নল থেকে নিঃসৃত আলোকের বর্ণালী বিশ্লেষণ করলে আর এক জাতীয় বর্ণালী দেখতে পাওয়া যায়। এইরূপ বর্ণালীতে রেখার পরিবর্তে কতকগুলি অবচ্ছিন্ন আলোকের পটি (Band) দেখা যায়। সেইজন্য এই ধরনের বর্ণালীকে বলা হয় 'পটি-বর্ণালী' (Band Spectrum)। পটি বর্ণালীর উৎপত্তি হয় বিভিন্ন মৌল বা যৌগের অণু থেকে। সেইজন্য এই বর্ণালীকে 'আণবিক বর্ণালী' আখ্যাও দেওয়া যায়। পটি-বর্ণালীর আলোক উৎস হিসাবে সাধারণতঃ মোক্ষণ নল ছাড়া প্রদীপ্ত শিখা বা বিভিন্ন ধাতব লবণপূর্ণ সছিদ্র কার্বন দণ্ডের সাহায্যে উৎপন্ন কার্বন-আর্ক ব্যবহার করা হয়।

পটি-বর্ণালী ভাল ভাবে নিরীক্ষণ করলে দেখা যায় যে, প্রত্যেকটি পটি এক প্রান্তে একটা নির্দিষ্ট সীমা পর্যন্ত বিস্তৃত হয় (9·1 চিত্র দ্রষ্টব্য)। এই সুস্পষ্ট সীমাকে বলা হয় 'পটি-শীর্ষ' (Band Head)। শীর্ষ থেকে পটির তীব্রতা অন্য প্রান্তের দিকে ক্রমশঃ ক্ষীণ হতে থাকে। অর্থাৎ অন্য প্রান্তে কোন সুস্পষ্ট সীমা থাকে না।

সাধারণতঃ অপেক্ষাকৃত নিম্ন বিশ্লেষণ ক্ষমতা সম্পন্ন বর্ণালীমাপক যন্ত্রের সাহায্যে পরীক্ষা করলে আণবিক বর্ণালীর মধ্যে পটি দেখা যায়। কিন্তু খুব উচ্চ বিশ্লেষণ ক্ষমতা সম্পন্ন বর্ণালীমাপক যন্ত্রের সাহায্যে বিশ্লেষণ করলে দেখা যায় যে প্রত্যেকটি পটি বহু সংখ্যক খুব কাছাকাছি অবস্থিত বর্ণালীরেখার

চিত্র 9·1

পটি-বর্ণালীর আলোকচিত্র। বিভিন্ন পটির বাঁ দিকে পটিশীর্ষ লক্ষণীয়।

( From Herzberg : Spectra of Diatomic Molecules, Vol. 1, published by Van Nostrand Reinhold Co., Copyright 1950 by Litton Publishing, Inc.)

সমাবেশে গঠিত। রেখাগুলির বিন্যাসে সব সময়ে একটা নির্দিষ্ট নিয়মানুযায়িতা লক্ষ্য করা যায়। সাধারণতঃ রেখাগুলি পটি মধ্যস্থ একটা বিশেষ অবস্থান থেকে শুরু করে দুই প্রান্তের দিকে পরপর বিন্যস্ত থাকে। পটি-শীর্ষের দিকে রেখাগুলি খুব ঘন সন্নিবিষ্ট থাকে। নির্দিষ্ট নিয়মে বিন্যস্ত এইরূপ অনেকগুলি পটি দেখা যায়। এগুলিকে 'পটি-গুচ্ছ' (Group of Bands) বলা হয়। পটি-বর্ণালীর মধ্যে এইরূপ একাধিক 'পটি-গুচ্ছ' দেখা যায়। সামগ্রিক ভাবে এদের বলা হয় 'পটি-সমাবেশ' (Band System)। আণবিক বর্ণালীর মধ্যে এই ধরনের অনেকগুলি 'পটি-সমাবেশ' দেখতে পাওয়া যায়। বিভিন্ন বস্তু কর্তৃক নিঃসৃত আণবিক বর্ণালীর পটিগুলিকে তরঙ্গদৈর্ঘ্য অনুযায়ী তিন শ্রেণীতে ভাগ করা যায়।

(ক) শুদ্ধ আবর্তন পটি (Pure Rotation Band): এইরূপ পটির বর্ণালীরেখাগুলির তরঙ্গদৈর্ঘ্য সাধারণতঃ 150 $\mu$ থেকে 30$\mu$ § পর্যন্ত বিস্তৃত হয়। এই তরঙ্গদৈর্ঘ্য অঞ্চলকে 'দূর-অবলোহিত' (Far Infra Red) অঞ্চল বলা যায়। দৃশ্যমান আলোকের তুলনায় এই সব বর্ণালীরেখার তরঙ্গদৈর্ঘ্য অনেক বেশী দীর্ঘ হয়।

(খ) আবর্তন-স্পন্দন পটি (Rotation-Vibration Band): এইরূপ পটির বর্ণালীরেখাগুলির তরঙ্গদৈর্ঘ্য 5 $\mu$ থেকে 1 $\mu$ পর্যন্ত বিস্তৃত হয়। এই অঞ্চলকে 'নিকট-অবলোহিত' (Near Infra Red) অঞ্চল বলা হয়।

(গ) ইলেকট্রনীয় পটি (Electronic Band): এইরূপ পটির বর্ণালীরেখগুলির তরঙ্গদৈর্ঘ্য 7000 অ্যাং 1000 অ্যাং পর্যন্ত বিস্তৃত হয়; অর্থাৎ এগুলি দৃশ্যমান বা অতিবেগনী অঞ্চলের মধ্যে অবস্থিত থাকে।

## 9·2. পটি-বর্ণালীর উৎপত্তির কারণ

পূর্ব অনুচ্ছেদে উল্লেখ করা হয়েছে যে পটি-বর্ণালীর উৎপত্তি হয় পদার্থের অণু থেকে। পটি-বর্ণালী উৎপন্নকারী পদার্থকে যদি খুব উচ্চ উষ্ণতা পর্যন্ত উত্তপ্ত করা হয়, তাহলে দেখা যায় যে বর্ণালীর প্রকৃতি পরিবর্তিত হয়ে যায়। পটিগুলি অদৃশ্য হয়ে যায় এবং অনেক ক্ষেত্রে তখন পদার্থটির অণু মধ্যস্থ বিভিন্ন পরমাণু কর্তৃক উৎপন্ন রেখা-বর্ণালী দেখতে পাওয়া যায়। উদাহরণস্বরূপ বুন্‌সেন বার্নারের শিখার মধ্যে সাধারণ লবণের দ্রবণের দ্বারা সিক্ত অ্যাসবেসটসের সূতা অনুপ্রবেশ করালে যে হলুদ বর্ণের আলোক নিঃসৃত

---

§ বিঃ দ্রঃ। $1\mu = 1$ মাইক্রন $= 10^{-4}$ সেমি $= 10{,}000$ অ্যাংস্ট্রম।

হয় তার বর্ণালী বিশ্লেষণ করলে সোডিয়ামের D-বর্ণালী রেখা দুটি দেখতে পাওয়া যায়। এর থেকে প্রমাণিত হয় যে পটি-বর্ণালীর উৎপত্তি হয় পদার্থের অণু থেকে। উচ্চ উষ্ণতায় অণুগুলি বিশ্লিষ্ট হয়ে তাদের বিভিন্ন পরমাণবিক উপাদানে ভেঙে যায়। উপরে প্রদত্ত উদাহরণে NaCl অণু বিশ্লিষ্ট হয়ে Na এবং Cl পরমাণুতে পর্যবসিত হয়।

আণবিক বর্ণালীর প্রকৃতি সাধারণতঃ পরমাণবিক বর্ণালী অপেক্ষা অনেক বেশী জটিল হয়। সরলতম অণু, অর্থাৎ দ্বিপরমাণুক (Diatomic) অণু থেকে নিঃসৃত আলোকের বর্ণালীর একটা সহজ ব্যাখ্যা নিম্নলিখিত উপায়ে পাওয়া যায়।

$H_2$, $N_2$, $O_2$, HCl, CN প্রভৃতি দ্বিপরমাণুক অণুর গঠন অনেকটা ডামবেলের (Dumb Bell) আকৃতি সম্পন্ন হয়। অণু মধ্যস্থ পরমাণু দুটি পরস্পরের থেকে নির্দিষ্ট দূরত্বে অবস্থিত থাকে। পরমাণু দুটির মধ্যে একটা আকর্ষণী বল ক্রিয়া করে, যার ফলে তারা অণুর মধ্যে আবদ্ধ অবস্থায় থাকে। পরমাণু দুটির ইলেকট্রনগুলি নিজ নিজ কক্ষপথে বিচরণ করে। এই কক্ষপথগুলি অবশ্য বিচ্ছিন্ন অবস্থায় স্থিত পরমাণুর ইলেকট্রনসমূহের কক্ষপথ থেকে ভিন্ন হয়। কারণ অণুর মধ্যে আবদ্ধ অবস্থায় যে কোন একটি পরমাণু অন্যটির ইলেকট্রনসমূহের গতিপথকে কিছুটা প্রভাবিত করে। পরমাণবিক বর্ণালী ব্যাখ্যা করবার সময় দেখা গেছে যে উক্ত বর্ণালীর উৎপত্তি হয় পরমাণুর বহিস্থ কক্ষপথের আবর্তনশীল ইলেকট্রনের বিভিন্ন শক্তি-স্তরের মধ্যে সংক্রমণের ফলে। দৃশ্যমান বর্ণালীরেখাগুলির তরঙ্গদৈর্ঘ্য থেকে জানা যায় যে পরমাণবিক শক্তিস্তরগুলির শক্তি কয়েক ইলেকট্রন-ভোল্টের মত হয়। অণুগুলির ক্ষেত্রেও ইলেকট্রনের কক্ষীয় গতির জন্য উৎপন্ন আণবিক শক্তিস্তরগুলির শক্তি ($E_e$) কয়েক ইলেকট্রন-ভোল্টের মত হয়।

আণবিক শক্তিস্তরগুলির শক্তি অবশ্য ইলেকট্রনগুলির কক্ষীয় গতি ছাড়া অণু সংশ্লিষ্ট আরও কয়েক প্রকার গতির উপর নির্ভর করে। একটি দ্বিপরমাণুক (Diatomic) অণুর মধ্যেকার পরমাণুগুলির কেন্দ্রক দুটি তাদের সংযোজী রেখা ধরে স্পন্দিত হতে পারে। অর্থাৎ কেন্দ্রক দুটির পারস্পরিক দূরত্ব সরল সমঞ্জস ভাবে (Simple Harmonically) হ্রাস-বৃদ্ধি পায়। এই স্পন্দনের জন্য অণুটির কিছু পরিমাণ স্পন্দন শক্তি (Vibrational Energy) $E_v$ থাকে। স্পষ্টতঃ আণবিক শক্তিস্তরের মোট শক্তির পরিমাণ ইলেকট্রনীয় শক্তি $E_e$ ছাড়া স্পন্দন শক্তি $E_v$ এর উপরেও নির্ভর করবে।

আবার অণুটির সামগ্রিক ভাবে একটা আবর্তন গতি থাকতে পারে। এর জন্য অণুটির কিছু পরিমাণ আবর্তন শক্তি (Rotational Energy) $E_r$ থাকবে। এই আবর্তন শক্তির উপরেও আণবিক শক্তিস্তরের মোট শক্তি নির্ভর করবে।

অণু মধ্যস্থ পরমাণু-সংযোজী রেখাকে অক্ষ করে অণুর আবর্তন সংঘটিত হতে পারে। অথবা উক্ত রেখার অভিলম্বে অণুর ভরকেন্দ্রের মধ্য দিয়ে অংকিত দুটি পারস্পারিক লম্ব রেখাকে অক্ষ করেও এইরূপ আবর্তন অনুষ্ঠিত হতে পারে। আবর্তন শক্তি নির্ভর করে 'জড়ত্ব-ভ্রামকের' (Moment of Inertia) উপর। কোন বস্তুর জড়ত্ব-ভ্রামক নির্ভর করে বস্তুর ভর এবং অক্ষ থেকে বস্তুর বিভিন্ন অংশের দূরত্বের উপর। যেহেতু কেন্দ্রকের ভর ইলেকট্রনের তুলনায় অনেক বেশী, আণবিক জড়ত্ব-ভ্রামক প্রধানতঃ কেন্দ্রকের ভরের উপরেই নির্ভর করে। এক্ষেত্রে আবর্তন-অক্ষ যদি পরমাণু সংযোজী রেখাটি হয়, তাহলে স্পষ্টতঃ জড়ত্ব-ভ্রামকের মান খুব কম হবে, কারণ পরমাণু কেন্দ্রক দুটি আকারে খুবই ছোট হয় ( $\sim 10^{-13}$ সেমি )। ফলে তাদের সংযোজী রেখা থেকে কেন্দ্রকের বিভিন্ন অংশের দূরত্ব প্রায় উপেক্ষণীয়। সুতরাং প্রধানতঃ সংযোজী রেখার অভিলম্বীয় অক্ষ বেষ্টন করে আবর্তনের জন্য অণুর যে আবর্তন শক্তি হয়, তা বিবেচনা করলেই চলবে।

উপরের আলোচনা থেকে বোঝা যায় যে আণবিক শক্তিস্তরের মোট শক্তি হচ্ছে

$$E = E_e + E_v + E_r \qquad (9\cdot1)$$

সাধারণতঃ ইলেকট্রনীয় শক্তি ($E_e$) ইলেকট্রন-ভোল্ট মাত্রিক হয়। এই শক্তির তুলনায় স্পন্দন শক্তি ($E_v$) অনেক কম হয়। আবার আবর্তন শক্তি ($E_r$) অপেক্ষাকৃত আরও অনেক কম হয়।

একটি অণুর দুটি শক্তিস্তরের শক্তি যদি যথাক্রমে $E_1$ এবং $E_2$ হয়, তাহলে স্তর দুটির মধ্যে সংক্রমণের ফলে নিঃসৃত বিকিরণের শক্তি হয়

$$h\nu = E_2 - E_1 \qquad (9\cdot2)$$

(9·1) এবং (9·2) সমীকরণের সাহায্যে শুদ্ধ আবর্তন, আবর্তন-স্পন্দন প্রভৃতি বিভিন্ন প্রকার আণবিক বর্ণালীর উৎপত্তির কারণ ব্যাখ্যা করা যায়।

## 9·3 : শুদ্ধ আবর্তন বর্ণালী

মনে করা যাক যে একটি অণুর ইলেকট্রনগুলি নির্দিষ্ট কক্ষপথে বিচরণ করে। সুতরাং অণুটির ইলেকট্রনীয় শক্তির ($E_e$) নির্দিষ্ট মান থাকে। এই অবস্থায় অণু মধ্যস্থ পরমাণু কেন্দ্রক দুটির স্পন্দন যদি উপেক্ষা করা যায়, তাহলে একমাত্র আবর্তন শক্তির ($E_r$) পরিবর্তনের জন্যই অণুটির শক্তি পরিবর্তন ঘটতে পারে।

ধরা যাক যে একটি দ্বিপরমাণুক অণুর পরমাণু দুটি একটি সুদৃঢ় দণ্ড (Rigid Rod) দ্বারা সংযুক্ত আছে এবং সমগ্র অণুটি এই সংযোজী দণ্ডের অভিলম্বে ভরকেন্দ্রের মধ্য দিয়ে অংকিত অক্ষ বেষ্টন করে আবর্তিত হয়। অর্থাৎ অণুটি যেন একটি দৃঢ় আবর্তকের (Rigid Rotator) মত আবর্তন করে।

অণু মধ্যস্থ দুটি পরমাণুর ভর যদি $m_1$ ও $m_2$ হয় এবং তাদের কেন্দ্রক দুটির মধ্যেকার দূরত্ব যদি $r$ হয় তাহলে অণুর ভরকেন্দ্র থেকে কেন্দ্রক দুটির দূরত্ব হবে যথাক্রমে

$$r_1 = \frac{m_2 r}{m_1 + m_2} \text{ এবং } r_2 = \frac{m_1 r}{m_1 + m_2}$$

সুতরাং অণুটির জড়ত্ব-ভ্রামক হবে

$$I = m_1 r_1^2 + m_2 r_2^2 = \frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2} r^2 = \mu r^2 \qquad (9{\cdot}3)$$

এখানে $\mu$ হচ্ছে অণুটির পরিণত ভর (Reduced Mass) :

$$\mu = \frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2}$$

অণুটির কৌণিক বেগ যদি হয় $\omega$, তাহলে এর কৌণিক ভরবেগ ($p$) এবং আবর্তন গতিশক্তি ($E_r$) হবে যথাক্রমে

$$p = I\omega \text{ এবং } E_r = \tfrac{1}{2} I\omega^2$$

এখন বোরের কোয়ানটাম তত্ত্ব অনুযায়ী কৌণিক ভরবেগ কোয়ানটায়িত হয়। সুতরাং আমরা লিখতে পারি :

$$p = I\omega = j\frac{h}{2\pi}$$

এখানে $j$ হচ্ছে আবর্তন কোয়ানটাম সংখ্যা (Rotational Quantum Number) ; এর সম্ভাব্য মান হচ্ছে $j=0, 1, 2, 3$ ইত্যাদি।

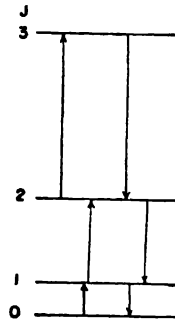
সুতরাং অণুটির আবর্তন শক্তি হবে

$$E_r = \tfrac{1}{2}I\left(\frac{jh}{2\pi I}\right)^2 = \frac{j^2h^2}{8\pi^2 I} \tag{9·4}$$

আধুনিক কোয়ানটাম বলবিদ্যা তত্ত্ব অনুযায়ী $j^2$ সংখ্যাটির বদলে $j(j+1)$ লেখা হয় ( 5·2 অনুচ্ছেদ দ্রষ্টব্য )। অতএব আমরা পাই

$$E_r = \frac{j(j+1)h^2}{8\pi^2 I} \tag{9·5}$$

সুতরাং $j$ কোয়ানটাম সংখ্যার বিভিন্ন মানের জন্য অণুর আবর্তন শক্তির বিভিন্ন অবচ্ছিন্ন (Discrete) মান থাকতে পারে। (9·2) চিত্রে একটি অণুর শুদ্ধ আবর্তন শক্তিস্তরগুলির (Pure Rotational Energy Levels) বিন্যাস দেখান হয়েছে। এইরূপ দুটি আবর্তন শক্তিস্তরের মধ্যে সংক্রমণের ফলে শুদ্ধ আবর্তন বর্ণালী (Pure Rotational Spectrum) সৃষ্ট হয়।

সনাতন তত্ত্ব অনুসারে কেবল সমেরু অণুর (Polar Molecules) আবর্তনের ফলে বিকিরণ নিঃসৃত হতে পারে। কারণ এই শ্রেণীর অণুর

চিত্র 9·2

অণুর শুদ্ধ আবর্তন স্তর।

মধ্যে ধনাত্মক ও ঋণাত্মক আধানকেন্দ্রদ্বয় পরস্পরের থেকে অপসৃত থাকে। তড়িৎচুম্বকীয় তত্ত্ব অনুযায়ী আবর্তনশীল আধান তড়িৎচুম্বকীয় বিকিরণ নিঃসৃত

করে। অপরপক্ষে $N_2$, $O_2$ প্রভৃতি মেরুহীন অণুর (Non-Polar Molecules) ক্ষেত্রে শুদ্ধ আবর্তনের ফলে বিকিরণ নিঃসৃত হতে পারে না। সুতরাং বোরের 'সাদৃশ্য তত্ত্ব' (Correspondence Principle) অনুযায়ী শুদ্ধ আবর্তন বর্ণালী কেবল সমেরু অণুর ক্ষেত্রেই সৃষ্ট হতে পারে। দুটি আবর্তন শক্তিস্তরের মধ্যে সংক্রমণ নির্ধারিত হয় নিম্নলিখিত নির্বাচন সূত্র (Selection Rule) দ্বারা

$$\Delta j = \pm 1 \tag{9·6}$$

সমীকরণ (9·5) অনুসারে $j$ এর মান উচ্চ হলে শক্তিস্তরের শক্তিও উচ্চ হয়। সুতরাং বিকিরণ নিঃসরণের ক্ষেত্রে $\Delta j = -1$ হয় এবং বিকিরণ শোষণের ক্ষেত্রে $\Delta j = +1$ হয়।

সমীকরণ (9·2) অনুসারে পরপর দুটি আবর্তন স্তরের মধ্যে সংক্রমণের ফলে নিঃসৃত বিকিরণের কম্পাংক হবে

$$\nu = \frac{E_{r_2} - E_{r_1}}{h} = \frac{h}{8\pi^2 I}\{j(j+1) - (j-1)j\}$$

$$= \frac{h}{4\pi^2 I} j \tag{9·7}$$

উপরের আলোচনা থেকে বোঝা যায় যে বিভিন্ন শুদ্ধ আবর্তন শক্তিস্তরের মধ্যে নির্বাচন সূত্র (9·6) দ্বারা নির্ধারিত সংক্রমণের ফলে বহু সংখ্যক বর্ণালী-রেখা উৎপন্ন হয়। সমষ্টিগত ভাবে এগুলি 'শুদ্ধ আবর্তন বর্ণালী' (Pure Rotational Spectrum) সৃষ্টি করে। এই বর্ণালীরেখাগুলির তরঙ্গদৈর্ঘ্য কীরূপ হওয়া উচিত তা নিম্নলিখিত উপায়ে নির্ণয় করা যেতে পারে। যেহেতু পরমাণবিক ভর $10^{-24}$ বা $10^{-23}$ গ্রাম মাত্রিক হয় এবং পরমাণু কেন্দ্রকগুলির ব্যবধান অ্যাংস্ট্রম মাত্রিক হয়, অতএব সমীকরণ (9·3) অনুযায়ী আণবিক জড়ত্ব-ভ্রামকের মান হয়

$$I \sim 10^{-23} \times 10^{-16} = 10^{-39} \text{ গ্রাম-সেমি}^2$$

সুতরাং যদি $j = 10$ ধরা হয়, তাহলে সমীকরণ (9·7) থেকে নিঃসৃত বিকিরণের কম্পাংক পাওয়া যায়

$$\nu = \frac{6·625 \times 10^{-27} \times 10}{4 \times 9·87 \times 10^{-39}} \approx 1·6 \times 10^{12}/\text{সেকেণ্ড}$$

এই বিকিরণের তরঙ্গদৈর্ঘ্য হবে

$$\lambda = \frac{c}{\nu} = \frac{3 \times 10^{10}}{1.6 \times 10^{12}} \backsimeq 0.02 \text{ সেমি} = 200\ \mu$$

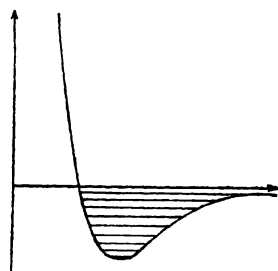
শুদ্ধ আবর্তন বর্ণালীরেখাগুলির তরঙ্গদৈর্ঘ্যের এই মান এবং পরিমিত মানের মাত্রার মধ্যে সংগতি পাওয়া যায়। স্পষ্টতঃ উপরোক্ত বর্ণালী-রেখাগুলির পারস্পরিক কম্পাংক ব্যবধান পরিমাপ করলে, (9·7) সমীকরণের সাহায্যে আণবিক জড়ত্ব ভ্রামকের মান ($I$) নির্ণয় করা যায়, এবং তার থেকে (9·3) সমীকরণের সাহায্যে অণু মধ্যস্থ পরমাণু কেন্দ্রক দুটির ব্যবধান $r$ নির্ণয় করা যেতে পারে।

শুদ্ধ আবর্তন বর্ণালীরেখাগুলি দূর অবলোহিত (Far Infra Red) অঞ্চলে অবস্থিত থাকে। এত দীর্ঘ তরঙ্গদৈর্ঘ্য সম্পন্ন রেখা নিয়ে পরীক্ষা অনুষ্ঠিত করা বেশ আয়াসসাধ্য। সাধারণ বর্ণালীমাপক যন্ত্র এক্ষেত্রে ব্যবহার করা যায় না। এই ধরনের আণবিক বর্ণালীর পরিবর্তে 'আবর্তন-স্পন্দন বর্ণালী' (Rotation Vibration Spectrum) বিষয়ক পরীক্ষা অনুষ্ঠিত করা অপেক্ষাকৃত অনেক সহজ।

## 9·4 : আবর্তন-স্পন্দন বর্ণালী

পূর্বেই উল্লেখ করা হয়েছে যে অণু মধ্যস্থ পরমাণু কেন্দ্রক দুটি স্থির থাকে না, তারা সংযোজী রেখা বরাবর স্পন্দিত হতে থাকে। অর্থাৎ (9·3) অনুচ্ছেদে অণুটিকে যে একটি দৃঢ় আবর্তক হিসাবে কল্পনা করা করা হয়েছে তার পরিবর্তে মনে করতে হবে যে এর পরমাণু দুটি যেন একটি ভরবিহীন স্প্রিং দ্বারা সংযুক্ত থাকে। যদি তাদের মধ্যেকার গড় ব্যবধান $r_0$ হয়, তাহলে যে কোন মুহূর্তে তাদের ব্যবধান একটি নির্দিষ্ট সীমার মধ্যে স্পন্দিত হতে থাকে। যদি এই সীমা $\Delta r$ গড় ব্যবধানের তুলনায় খুব ছোট হয়, ($\Delta r << r_0$), তাহলে উক্ত স্পন্দন সরল সমঞ্জস ভাবে (Simple Harmonically) ঘটে। অন্যথায় স্পন্দন ঠিক সরল সমঞ্জস ভাবে ঘটে না।

অণু মধ্যস্থ পরমাণু দুটির মধ্যে একটা আকর্ষণী বল ক্রিয়া করে। এই আকর্ষণী বল নানা কারণে উদ্ভূত হতে পারে। NaCl, KCl প্রভৃতি যৌগের ক্ষেত্রে অণুর মধ্যে পরমাণু দুটি আয়নিত অবস্থায় থাকে; যথা $Na^+$ এবং $Cl^-$ বা $K^+$ এবং $Cl^-$ ইত্যাদি। এইরূপ বিপরীত আধানবাহী

দুটি আয়নের মধ্যে কুলম্ব আকর্ষণী বল ক্রিয়া করে। যখন তারা পরস্পর থেকে অসীম দূরত্বে থাকে তখন তাদের স্থিতিশক্তি শূন্য ধরা যেতে পারে। পরস্পরের দিকে আকৃষ্ট হয়ে তারা যত নিকটে আসে তাদের স্থিতিশক্তি তত ঋণাত্মক দিকে বাড়তে থাকে। অবশেষে যখন তাদের ব্যবধান একটা ন্যূনতম মান $r_0$ অপেক্ষা কম হয়, তখন তাদের মধ্যে দ্রুত পরিবর্তনশীল বিকর্ষণী বল ক্রিয়া করতে শুরু করে। এর কারণ হচ্ছে দুটি পরমাণুর ধনাত্মক আধানবাহী কেন্দ্রক দুটি পরস্পরকে কুলম্ব সূত্র অনুযায়ী বিকর্ষণ করে ; কেন্দ্রক দুটি যত কাছাকাছি আসে, এই বিকর্ষণী বল তত বৃদ্ধি পায়। তাছাড়া পাউলির অপবর্জন তত্ত্বের (Pauli's Exclusion Principle) ফলে আর এক প্রকার বিকর্ষণী বলের উদ্ভব হয়। এই উভয় প্রকার বিকর্ষণী বলের ক্রিয়ার ফলে কেন্দ্রক-ব্যবধান $r$ যখন $r_0$ অপেক্ষা কম হয়, তখন স্থিতিশক্তি আবার বিপরীত দিকে বৃদ্ধি পায়, কারণ বিকর্ষণী বল জনিত স্থিতিশক্তির মান ধনাত্মক হয়। ফলে যখন $r=r_0$ হয়, তখন স্থিতিশক্তি ন্যূনতম হয়। অর্থাৎ অণুটি যেন একটি বিভব কূপের (Potentlal Well) মধ্যে অবস্থান করে ; ঠিক যেমন হয় ধাতু মধ্যস্থ ইলেকট্রনের ক্ষেত্রে ( 4·10 অনুচ্ছেদ দ্রষ্টব্য )। NaCl প্রভৃতি অণু মধ্যস্থ পরমাণুগুলির বন্ধনকে আয়নীয় বন্ধন (Ionic Binding) বলা হয়। আয়নীয় বন্ধনের ক্ষেত্রে স্থিতিশক্তির উপরোক্ত প্রকার পরিবর্তন (9·3) চিত্রে

চিত্র 9·3

দ্বিপরমাণুক অণুর ক্ষেত্রে কেন্দ্রক ব্যবধানের সংগে আণবিক স্থিতিশক্তি পরিবর্তনের লেখচিত্র।

দেখান হয়েছে। $H_2$ এবং বিভিন্ন জৈব যৌগের (Organic Compound) ক্ষেত্রে আণবিক বন্ধনের প্রকৃতি ভিন্ন হয়। তবে এসব ক্ষেত্রেও আবদ্ধ অবস্থায় অণুটি একটি বিভব কূপের মধ্যে অবস্থান করে।

উপরোক্ত দুই প্রকার বিপরীতমুখী বলের ক্রিয়ার ফলে অণু মধ্যস্থ পরমাণু দুটি বিপরীত দশায় (Phase) স্পন্দিত হতে থাকে, যাতে এদের ভরকেন্দ্র সব সময়ে স্থিরাবস্থায় থাকে। যদি পরমাণু দুটির মধ্যে সাম্যাবস্থার ব্যবধান $r_0$ হয়, তাহলে এই ব্যবধান যখন $x$ পরিমাণে পরিবর্তিত হয়, তখন এদের মধ্যে $x$ সংখ্যাটির সমানুপাতিক একটি বল ক্রিয়া করে। যদি পরমাণু দুটির ভর $m_1$ ও $m_2$ হয় এবং যে কোন মুহূর্তে এদের ব্যবধান $r = r_0 + x$ হয়, তাহলে এদের আপেক্ষিক গতির সমীকরণ লেখা যায়ঃ

$$\mu \ddot{r} = -kx$$

এখানে $\mu$ হচ্ছে পরিণত ভর (Reduced Mass):

$$\mu = \frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2}$$

যেহেতু $\ddot{r} = \ddot{x}$, অতএব আমরা পাই

$$\mu \ddot{x} = -kx$$

অর্থাৎ $$\ddot{x} + \frac{k}{\mu} x = 0$$

সুতরাং স্পন্দন কম্পাংক হয়

$$\nu_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{\mu}}$$

পুরাতন কোয়ানটাম তত্ত্ব অনুযায়ী আণবিক স্পন্দন শক্তি হবে

$$E_v = vh\nu_0 = v\frac{h}{2\pi}\sqrt{\frac{k}{\mu}} \qquad (9{\cdot}8)$$

এখানে $v$ হচ্ছে একটি পূর্ণ সংখ্যা ; একে বলা হয় স্পন্দন কোয়ানটাম সংখ্যা (Vibrational Quantum Number)। এর সম্ভাব্য মান হচ্ছে $v = 0, 1, 2, 3, \cdots$ ইত্যাদি।

$\nu_0$ সংখ্যাটিকে বলা হয় 'প্রকৃত কম্পাংক' (Proper Frequency)। অণুটি যখন নিম্নতম স্পন্দন শক্তিস্তরে থাকে ($v = 1$), তখন তার স্পন্দন কম্পাংক $\nu_0$ হয়।

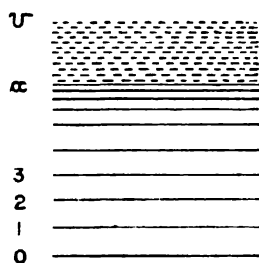
আধুনিক কোয়ানটাম বলবিদ্যার তত্ত্ব অনুযায়ী স্পন্দন শক্তির মান (9·8)

সমীকরণ থেকে প্রাপ্ত মান অপেক্ষা অল্প পৃথক হয়। এই তত্ত্ব অনুযায়ী সরল সমঞ্জস স্পন্দনের ক্ষেত্রে পাওয়া যায়

$$E_v = (v + \tfrac{1}{2})h\nu_0 \tag{9.9}$$

এখানে স্পন্দন কোয়ানটাম সংখ্যা $v$ পূর্বের মতই পূর্ণসংখ্যা হয়। যদি আণবিক আবর্তন সম্পূর্ণ উপেক্ষা করা যায় তাহলে স্পন্দন স্তরগুলির মধ্যেকার সংক্রমণ নির্ধারিত হয় $\Delta v = \pm 1$ নির্বাচন সূত্র দ্বারা। এইরূপ আবর্তন শক্তিহীন পরপর দুটি স্পন্দন স্তরের মধ্যে সংক্রমণের ফলে নিঃসৃত বিকিরণের কম্পাংক $\nu_0$ হওয়া উচিত ( শুদ্ধ স্পন্দন সংক্রমণ )।

সমীকরণ (9·9) অনুসারে আণবিক স্পন্দন জনিত পরপর শক্তিস্তরগুলির মধ্যে শক্তি ব্যবধান $h\nu_0$ ধ্রুবক হওয়া উচিত। প্রকৃতপক্ষে কিন্তু স্পন্দন কোয়ানটাম সংখ্যা $v$ যখন খুব উচ্চ হয় তখন স্পন্দনের বিস্তার (Amplitude) $\Delta r$ খুব উচ্চ হয়। সেক্ষেত্রে স্পন্দন সরল সমঞ্জস ভাবে হয় না, একথা পূর্বে উল্লেখ করা হয়েছে।

সুতরাং খুব উচ্চ মান সম্পন্ন $v$-এর ক্ষেত্রে স্পন্দন শক্তি সমীকরণ (9·9) দ্বারা নির্ধারিত হয় না। $v$ যত উচ্চ হয় পরপর শক্তিস্তরগুলির শক্তির

চিত্র 9·4

আণবিক স্পন্দন শক্তিস্তর। অভিসারী সীমার ($v = \infty$) উপরে ভগ্ন রেখাগুলি দ্বারা শক্তিস্তরের নিরবচ্ছিন্ন অঞ্চল (Continuum) দেখান হয়েছে।

ব্যবধান তত কম হতে থাকে। ফলে $v$ যখন অসীমের দিকে যায়, অর্থাৎ পরমাণু দুটির ব্যবধান যখন খুব বেশী হয়ে যায়, তখন শক্তিস্তরগুলির শক্তি একটা নির্দিষ্ট উচ্চতম সীমা পর্যন্ত বিস্তৃত হয়। এই সীমাকে বলা হয় 'অভিসারী সীমা' (Convergence Limit)। এরপর অণুটি বিশ্লিষ্ট

হয়ে দুটি স্বতন্ত্র পরমাণুতে পরিণত হয়। আণবিক স্পন্দন শক্তিস্তরের উপরোক্ত প্রকার বিন্যাস (9·4) চিত্রে প্রদর্শিত হয়েছে।

আণবিক স্পন্দনের সংগে সংগে (9·3) অনুচ্ছেদে আলোচিত আণবিক আবর্তনও ঘটতে পারে। অণুর মোট শক্তি এর আবর্তন শক্তি এবং স্পন্দন শক্তি, এই দুই প্রকার শক্তির উপরেই নির্ভর করে। মোটামুটিভাবে অণুর মোট শক্তি লেখা যেতে পারে ( সমীকরণ 9·5 এবং 9·9 দ্রষ্টব্য ) ঃ

$$E_{vr}=E_v+E_r=h\nu_0\left(v+\frac{1}{2}\right)+\frac{h^2}{8\pi^2 I}\,j(j+1) \qquad (9{\cdot}10)$$

অণু মধ্যস্থ পরমাণু দুটির স্পন্দনের ফলে তাদের ব্যবধান প্রতি মুহূর্তে পরিবর্তিত হয়। সুতরাং এর জড়ত্ব-ভ্রামক ($I$) ধ্রুবক থাকতে পারে না। সমীকরণ (9·5) নির্ণয় করার সময় ধরা হয় যে $I=$ ধ্রুবক। আবার অণুটির আবর্তনের ফলে পরমাণু দুটির মধ্যে অভিকেন্দ্রিক বল (Centripetal Force) ক্রিয়া করে। সমীকরণ (9·9) প্রতিপাদনের সময় এইরূপ কোন বলের অস্তিত্ব বিবেচনা করা হয় না। উপরের আলোচনা থেকে বোঝা যায় যে অণুর আবর্তন গতি এবং স্পন্দন গতি পরস্পরকে প্রভাবিত করে। সেজন্য সমীকরণ (9·10) সম্পূর্ণ সঠিক হতে পারে না। তবে এই সমীকরণকে মোটামুটিভাবে ঠিক ধরে নিলে দুটি আণবিক শক্তিস্তরের মধ্যে সংক্রমণের ফলে উৎপন্ন আবর্তন-স্পন্দন (Rotation-Vibration ) বর্ণালীরেখার কম্পাংক নির্ণয় করা যায় ঃ

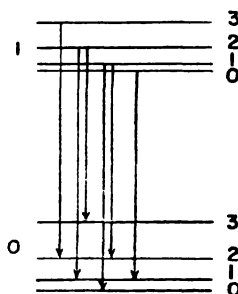
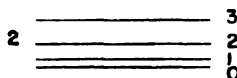
$$\nu_{vr}=(E_v'+E_r')-(E_v+E_r)$$
$$=\nu_0(v'-v)+\frac{h}{8\pi^2}\left\{\frac{j'(j'+1)}{I'}-\frac{j(j+1)}{I}\right\} \qquad (9{\cdot}11)$$

আবর্তন-স্পন্দন বর্ণালীরেখা উৎপাদনকারী সংক্রমণ নিম্নলিখিত নির্বাচন সূত্রগুলি (Selection Rules) দ্বারা নির্ধারিত হয় ঃ

$$\Delta v=\pm 1,\ \pm 2,\ \pm 3 \text{ ইত্যাদি}$$
$$\Delta j=\pm 1 \qquad (9{\cdot}12)$$

কোন কোন অণুর ক্ষেত্রে $\Delta j=0$ সংক্রমণটিও ঘটে থাকে।

এখানে উল্লেখযোগ্য যে বিভিন্ন স্পন্দন শক্তিস্তরে অণুর জড়ত্ব-ভ্রামকের মান ভিন্ন হয়। (9·11) সমীকরণে চরম ও আদি শক্তিস্তরে জড়ত্ব-ভ্রামক $I$ এবং $I'$ দ্বারা নির্দেশিত করা হয়েছে।

স্পন্দন শক্তির একটি নির্দিষ্ট মানে ( $v$ = ধ্রুবক ) আবর্তন কোয়ানটাম সংখ্যার বিভিন্ন মান থাকতে পারে। ফলে প্রতিটি স্পন্দন শক্তিস্তরের মধ্যে বহু সংখ্যক কাছাকাছি অবস্থিত আবর্তন শক্তিস্তর থাকে। এখানে উল্লেখযোগ্য যে স্পন্দন শক্তির মান $\nu_0$, অর্থাৎ প্রকৃত কম্পাংকের উপর নির্ভরশীল। এই কম্পাংক সাধারণতঃ এমন হয় যে স্পন্দন শক্তির মান আবর্তন শক্তির তুলনায়

চিত্র 9·5

আণবিক স্পন্দন ও আবর্তন শক্তিস্তর। আবর্তন শক্তিস্তরগুলির পারস্পরিক ব্যবধান বহুগুণ বর্ধিত করে দেখান হয়েছে।

কয়েকশত গুণ বেশী হয়, অর্থাৎ $E_v >> E_r$ হয়। উদাহরণস্বরূপ, HCl অণুর ক্ষেত্র পরীক্ষা দ্বারা নির্ণীত 'প্রকৃত স্পন্দন তরঙ্গসংখ্যা' (Proper Vibrational Wave Number) হচ্ছে $\bar{\nu}_0 = \nu_0/c = 2907$ সেমি$^{-1}$ ; অপরপক্ষে উক্ত অণুর 'আবর্তন তরঙ্গসংখ্যা' (Rotational

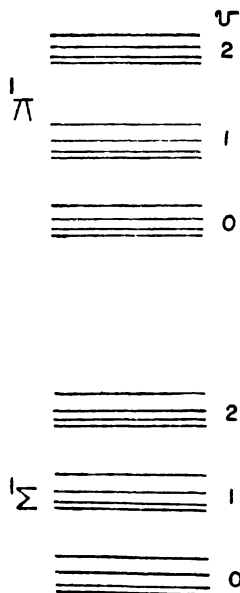
Wave Number) $\bar{\nu}_r = \nu_r/c = 20{\cdot}8$ সেমি $^{-1}$ পাওয়া যায়। (9·5) চিত্রে পরপর দুটি স্পন্দন শক্তিস্তরের অন্তর্গত আবর্তন শক্তিস্তরগুলি প্রদর্শিত হয়েছে। প্রকৃতপক্ষে আবর্তন শক্তিস্তরগুলির পারস্পরিক ব্যবধান স্পন্দন শক্তিস্তরগুলির পারস্পরিক ব্যবধানের শতাংশেরও কম হয়। (9·5) চিত্রে অবশ্য আবর্তন শক্তিস্তরগুলির পারস্পরিক ব্যবধান অনেক পরিবর্ধিত করে দেখান হয়েছে। উক্ত চিত্রে বিভিন্ন শক্তিস্তরগুলির মধ্যে (9·12) নির্বাচন-সূত্র দ্বারা নির্ধারিত সম্ভাব্য কতকগুলি সংক্রমণও দেখান হয়েছে। চিত্র থেকে সহজেই প্রতীয়মান হয় যে দুটি স্পন্দন স্তরের মধ্যে সংক্রমণের ফলে বহু সংখ্যক আবর্তন-স্পন্দন বর্ণালীরেখার উৎপত্তি হয়। এই রেখাগুলির কম্পাংক বা তরঙ্গ-সংখ্যা ব্যবধান খুবই কম হয়। ফলে সাধারণ বর্ণালীমাপক যন্ত্রে এগুলি পৃথক পৃথক রেখা হিসাবে দেখা যায় না, একটি আলোক পটির (Band) মত দেখায়। এইভাবে আবর্তন-স্পন্দন পটির (Rotation Vibration Band) উৎপত্তি ব্যাখ্যা করা যায়।

এখানে উল্লেখযোগ্য যে, (9·12) সমীকরণ দ্বারা নির্ধারিত বিভিন্ন সম্ভাব্য স্পন্দন সংক্রমণগুলির মধ্যে $\Delta v = \pm 1$ সংক্রমণটির সম্ভাব্যতাই খুব বেশী হয়। পরীক্ষার দ্বারা এই সিদ্ধান্ত সমর্থিত হয়। দেখা যায় যে আবর্তন-স্পন্দন পটিগুলির মধ্যে $\Delta v = \pm 1$ সংক্রমণের ফলে উৎপন্ন পটিটির তীব্রতা অন্য পটিগুলি অপেক্ষা অনেক বেশী হয়।

উপরে প্রদত্ত উদাহরণে HCl অণুর প্রকৃত কম্পাংকের মান থেকে সংশ্লিষ্ট তরঙ্গদৈর্ঘ্য পাওয়া যায় $1/\bar{\nu}_0 = 34{,}400$ অ্যাং $= 3{\cdot}44$ মাইক্রন। স্পষ্টতঃ আবর্তন-স্পন্দন বর্ণালীরেখাগুলির তরঙ্গদৈর্ঘ্যের মান উপরে প্রদত্ত রাশিটির সমমাত্রিক হয়। অর্থাৎ এই রেখাগুলি 'নিকট অবলোহিত' (Near Infra Red) অঞ্চলে অবস্থিত থাকে। সেজন্য শুদ্ধ আবর্তন বর্ণালীর (Pure Rotation Spectrum) তুলনায় আবর্তন-স্পন্দন বর্ণালী সংক্রান্ত পরীক্ষা অনুষ্ঠিত করা অনেক বেশী সুবিধাজনক। আবর্তন-স্পন্দন বর্ণালীরেখাগুলির কম্পাংক ব্যবধান পরিমাপ করে আণবিক আবর্তন সম্বন্ধীয় যাবতীয় তথ্য পাওয়া সম্ভব।

শুদ্ধ আবর্তন বর্ণালীর মত আবর্তন-স্পন্দন বর্ণালীও কেবল সমেরু অণুর ক্ষেত্রে পাওয়া যায়, মেরুহীন অণুর ক্ষেত্রে পাওয়া যায় না।

উপরের আলোচনায় ধরে নেওয়া হয়েছে যে অণুটির ইলেকট্রনীয় শক্তি ($E_e$) পরিবর্তিত হয় না। (9·2) অনুচ্ছেদে উল্লেখ করা হয়েছে যে

ইলেকট্রনীয় শক্তিস্তরের শক্তির মান পরমাণবিক শক্তিস্তরের শক্তির সমমাত্রিক, অর্থাৎ কয়েক ইলেকট্রন-ভোল্টের মত হয়। সুতরাং এই শক্তিস্তরগুলির পারস্পরিক শক্তি ব্যবধান এমন হয় যে তাদের মধ্যে সংক্রমণের ফলে উৎপন্ন বর্ণালীরেখাগুলির তরঙ্গসংখ্যা $10^4$ সেমি $^{-1}$ অপেক্ষা বেশী হয়। অর্থাৎ সেগুলি দৃশ্যমান অঞ্চলে অবস্থিত হয়। এর থেকে বোঝা যায় যে আণবিক

চিত্র 9·6

অণুর ইলেকট্রনীয় শক্তিস্তর। চিত্রে $^1\Sigma$ ও $^1\Pi$ দুটি ইলেকট্রনীয় শক্তিস্তরের অন্তর্গত স্পন্দন ও আবর্তন শক্তিস্তরগুলিকে বহুগুণে বর্ধিত করে দেখান হয়েছে।

ইলেকট্রনীয় শক্তি স্পন্দন শক্তির তুলনায় অনেক বেশী হয় ($E_e >> E_v$)। একটি নির্দিষ্ট ইলেকট্রনীয় শক্তি সম্পন্ন অণু বিভিন্ন স্পন্দন শক্তিস্তরে অবস্থিত থাকতে পারে। আবার প্রতিটি স্পন্দন শক্তিস্তরের সংলগ্ন বহু সংখ্যক আবর্তন শক্তিস্তর থাকতে পারে। সমীকরণ (9·1) অনুসারে অণুর মোট শক্তি উপরোক্ত তিন প্রকার শক্তির সমষ্টির সমান হয়। (9·6) চিত্রে দুটি ইলেকট্রনীয় শক্তিস্তরের অন্তর্গত বিভিন্ন সম্ভাব্য স্পন্দন এবং আবর্তন স্তরগুলি

দেখান হয়েছে। এদের মধ্যে সংক্রমণের ফলে উৎপন্ন রেখাগুলির সমন্বয়ে ইলেকট্রনীয় পটি-বর্ণালী (Electronic Band Spectrum) উৎপন্ন হয়। বিভিন্ন সম্ভাব্য সংক্রমণগুলি নির্বাচন-সূত্র (9·12) দ্বারা নির্ধারিত হয়। ইলেকট্রনীয় পটিগুলি প্রকৃতপক্ষে আবর্তন-স্পন্দন পটিগুলিরই সমগোত্রীয়। কেবল এক্ষেত্রে পটি মধ্যস্থ রেখাগুলির তরঙ্গদৈর্ঘ্য দৃশ্যমান অঞ্চলে পড়ে। সেজন্য এই পটিগুলি নিয়ে বর্ণালী বিষয়ক (Spectroscopic) পরীক্ষা করা সর্বাপেক্ষা সুবিধাজনক।

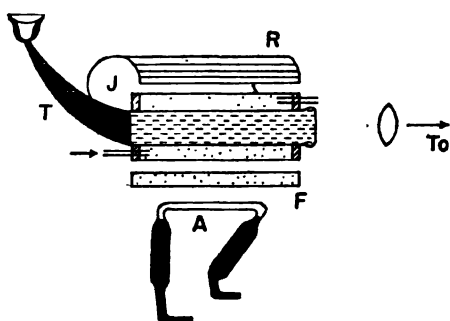
আণবিক বর্ণালী সংক্রান্ত পরীক্ষা অনুষ্ঠিত করে অণুর গঠন সম্বন্ধীয় যাবতীয় তথ্য নির্ণয় করা সম্ভব। উপরের আলোচনায় আণবিক বর্ণালীর উৎপত্তির কারণ মোটামুটি ভাবে ব্যাখ্যা করা হয়েছে। প্রকৃতপক্ষে সমগ্র বিষয়টি খুবই জটিল। বর্তমান সংক্ষিপ্ত আলোচনায় আণবিক বর্ণালী সংক্রান্ত সকল তথ্য আলোচনা করা সম্ভব নয়।

### 7·5 : রামন ক্রিয়া

১৯২৮ সালে প্রখ্যাত ভারতীয় বিজ্ঞানী চন্দ্রশেখর ভেংকট রামন (C. V. Raman) লক্ষ্য করেন যে বেন্‌জীন (Benzene), টোলুইন (Toluene) প্রভৃতি বিভিন্ন তরলের মধ্য দিয়ে একবর্ণী দৃশ্যমান আলোক রশ্মি পাঠালে, আপতিত রশ্মির অভিলম্বে বিক্ষিপ্ত বিকিরণের মধ্যে আদি তরঙ্গদৈর্ঘ্য সম্পন্ন বিকিরণ ছাড়াও অপেক্ষাকৃত ক্ষুদ্রতর এবং দীর্ঘতর তরঙ্গদৈর্ঘ্য সম্পন্ন বিক্ষিপ্ত বিকিরণ পাওয়া যায়। এই সংঘটনকে বলা হয় 'রামন ক্রিয়া' (Raman Effect)। পরবর্তী যুগে নানাবিধ কঠিন, তরল এবং গ্যাসীয় পদার্থের মধ্যে রামন ক্রিয়া পরিলক্ষিত হয়।

রামনের প্রাথমিক পরীক্ষার পরে এই ক্রিয়া পর্যবেক্ষণের জন্য অনেক উন্নততর পরীক্ষা পদ্ধতি উদ্ভাবিত হয়। নিম্নে বর্ণিত পরীক্ষা পদ্ধতি প্রধানতঃ রবার্ট উড (R. W. Wood) নামক আমেরিকান বিজ্ঞানী উদ্ভাবন করেন।

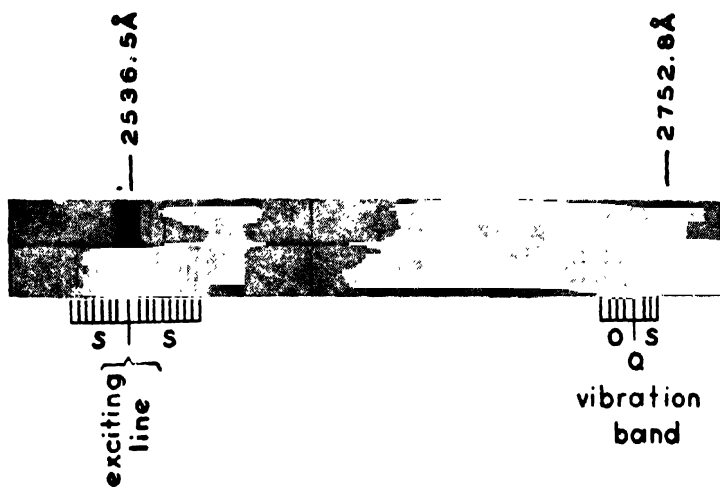
(9·7) চিত্রে T একটি শিঙার (Horn) আকৃতি সম্পন্ন কাঁচ নল। এই নলের মধ্যে পরীক্ষাধীন তরল রাখা থাকে। নলটির বহির্গাত্র কৃষ্ণায়িত করা থাকে। নলের এক প্রান্তে একটি সমতল কাঁচের প্লেট লাগান থাকে। এই প্লেটের মধ্য দিয়ে তরলের দ্বারা বিক্ষিপ্ত বিকিরণ S বর্ণালীবীক্ষণ (Spectroscope) যন্ত্রের মধ্যে প্রবেশ করে। A হচ্ছে একটি আলোক

উৎস। সাধারণতঃ পারদের আর্ক বাতি (Arc Lamp) আলোক উৎস হিসাবে ব্যবহার করা হয়। এই উৎস থেকে নিঃসৃত আলোকের মধ্যে বিভিন্ন তরঙ্গদৈর্ঘ্য সম্পন্ন বিকিরণ থাকে। উৎস নিঃসৃত আলোক রশ্মি F পরিস্রাবকের (Filter) মধ্য দিয়ে পাঠান হয়; ফলে এর অপরদিকে একবর্ণী (Monochromatic) আলোক নির্গত হয়। পরিস্রাবক F প্রকৃতপক্ষে একটি কাঁচ পাত্রে রাখা কোন একপ্রকার বিশেষ তরল। যদি এই তরল আম্লিক কুইনাইন সালফেট দ্রবণ (Acidulated Quinine Sulphate Solution) হয়, তাহলে নিঃসৃত একবর্ণী আলোকের তরঙ্গদৈর্ঘ্য পাওয়া যায় 4358 অ্যাং। অপরপক্ষে কার্বন টেট্রাক্লোরাইডে দ্রবীভূত আয়োডিন দ্রবণ (Solution of Iodine in Carbon Tetrachloride) ব্যবহার করলে 4046 অ্যাং তরঙ্গদৈর্ঘ্য সম্পন্ন একবর্ণী আলোক পাওয়া যায়।

চিত্র 9·7

রামন ক্রিয়া পর্যবেক্ষণের পরীক্ষা ব্যবস্থা।

F থেকে নির্গত আলোক T নল মধ্যস্থ তরলের দ্বারা বিক্ষিপ্ত হয়। বিক্ষিপ্ত আলোকের কিছু অংশ আপতিত রশ্মির অভিলম্বে বর্ণালীবীক্ষণ যন্ত্রের মধ্যে প্রবেশ করে এবং উক্ত বিক্ষিপ্ত আলোকের বর্ণালীর আলোকচিত্র গ্রহণ করা হয়। পরীক্ষাধীন তরল যাতে আপতিত আলোকের প্রভাবে উত্তপ্ত না হয়ে যায় সেজন্য সাধারণতঃ T নলটি জল-পূর্ণ J আবরণীর (Jacket) দ্বারা বেষ্টন করা থাকে। তাছাড়া আলোকের তীব্রতা বৃদ্ধি করার জন্য T নলকে বেষ্টন করে R প্রতিফলক ব্যবহার করা হয়।

(9·8) চিত্রে রামন বর্ণালীর কয়েকটি আলোকচিত্র দেখান হয়েছে। চিত্রে রামন ক্রিয়ার ফলে বিক্ষিপ্ত বিকিরণের বর্ণালীতে আদি তরঙ্গদৈর্ঘ্য সম্পন্ন

চিত্র 9·8

রামন বর্ণালীর আলোকচিত্র।

উৎপাদক-রেখার (Parent Line) দুই পাশে আরও কয়েকটি নূতন ক্ষীণতর বর্ণালীরেখার নিদর্শন পাওয়া যায়। এই রেখাগুলির তীব্রতা বৃদ্ধির জন্য আপতিত আলোকের তীব্রতা যতদূর সম্ভব বৃদ্ধি করার ব্যবস্থা করা হয়। তাছাড়া পরীক্ষাকাল যথেষ্ট পরিমাণে বৃদ্ধি করে বর্ণালীবীক্ষণ যন্ত্রের মধ্যে অবস্থিত ফোটোগ্রাফিক প্লেটের উপর আলোকসম্পাত কালও (Exposure Time) যতদূর সম্ভব বৃদ্ধি করা হয়।

## 9·6 : রামন বর্ণালীর বিশেষত্ব

যত্ন সহকারে পর্যবেক্ষণ করলে রামন বর্ণালীর নিম্নলিখিত বিশেষত্বগুলি লক্ষ্য করা যায়ঃ

(ক) রামন ক্রিয়ার ফলে উৎপাদক বর্ণালীরেখা ছাড়া দীর্ঘতর এবং ক্ষুদ্রতর তরঙ্গদৈর্ঘ্য সম্পন্ন কয়েকটি ক্ষীণ বর্ণালীরেখা রামন বর্ণালীতে দেখা যায়। দীর্ঘতর তরঙ্গদৈর্ঘ্য ( বা ক্ষুদ্রতর কম্পাংক ) সম্পন্ন রেখাগুলিকে বলা হয় 'ষ্টোক্‌স্ রেখা' (Stokes Lines)। ক্ষুদ্রতর তরঙ্গদৈর্ঘ্য ( বা বৃহত্তর কম্পাংক ) সম্পন্ন রেখাগুলিকে বলা হয় 'বিপরীত ষ্টোক্‌স্ রেখা' (Anti-Stokes Lines)। এখানে উল্লেখযোগ্য যে প্রতিপ্রভ বর্ণালীতে (Fluorescent Spectrum) কেবল ষ্টোক্‌স্ রেখা দেখা যায় ( 3·16 অনুচ্ছেদ দ্রষ্টব্য )। বিপরীত ষ্টোক্‌স্ রেখা কেবল রামন বর্ণালীতেই দেখা যায়।

(খ) ষ্টোক্‌স্ ও বিপরীত ষ্টোক্‌স্ রেখাগুলি উৎপাদক রেখার দুই পাশে সমান কম্পাংক ব্যবধানে অবস্থিত থাকে। এই রেখাগুলির কম্পাংক উৎপাদক রেখার কম্পাংকের উপর নির্ভর করে। এখানে উল্লেখযোগ্য যে প্রতিপ্রভ বর্ণালীর ক্ষেত্রে ঠিক এর বিপরীত ঘটে। সেক্ষেত্রে ষ্টোক্‌স্ রেখাগুলির কম্পাংক উৎপাদক রেখার কম্পাংকের উপর নির্ভর করে না, প্রতিপ্রভা উৎপাদক পদার্থের প্রকৃতির উপর নির্ভর করে ( 3·16 অনুচ্ছেদ দ্রষ্টব্য )।

(গ) উৎপাদক রেখা থেকে ষ্টোক্‌স্ ও বিপরীত ষ্টোক্‌স্ রেখাগুলির কম্পাংক ব্যবধান ($\Delta\nu$) নির্ভর করে পরীক্ষাধীন পদার্থের প্রকৃতির উপর ; উৎপাদক রেখার কম্পাংকের উপর নির্ভর করে না। যদি $\nu_0$ হয় উৎপাদক রেখার কম্পাংক, তাহলে ষ্টোক্‌স্ ও বিপরীত ষ্টোক্‌স্ রেখা দুটির কম্পাংক হয় যথাক্রমেঃ

$$\nu' = \nu_0 - \Delta\nu \quad \text{( ষ্টোক্‌স্ রেখা )} \tag{9·13}$$

$$\nu'' = \nu_0 + \Delta\nu \quad \text{( বিপরীত ষ্টোক্‌স্ রেখা )} \tag{9·14}$$

এখানে উল্লেখযোগ্য যে যদি উৎপাদক রেখার কম্পাংক $\nu_0$ পরিবর্তিত করা যায়, তাহলে রামন রেখাগুলির কম্পাংক $\nu'$ এবং $\nu''$ এমনভাবে পরিবর্তিত হয় যে $\nu_0$ থেকে তাদের কম্পাংক ব্যবধান $\Delta\nu$ অপরিবর্তিত থাকে। দৃশ্যমান অঞ্চলে অবস্থিত উৎপাদক রেখাটির কম্পাংকের তুলনায় রামন রেখাগুলির কম্পাংক ব্যবধান অনেক কম হয়। অর্থাৎ $\Delta\nu << \nu_0$ হয়। বস্তুতঃ এই ব্যবধান $\Delta\nu$ সাধারণতঃ পরীক্ষাধীন পদার্থের শোষণ বর্ণালীতে প্রাপ্ত অবলোহিত অঞ্চলে অবস্থিত বিশেষ বিশেষ বর্ণালী রেখার কম্পাংকের সমান হয়।

(ঘ) রামন রেখাগুলির তীব্রতা (Intensity) সাধারণতঃ উৎপাদক রেখার তুলনায় খুব কম হয়। এদের মধ্যে ষ্টোক্স্ রেখাগুলির তীব্রতা বিপরীত ষ্টোক্স্ রেখাগুলির তুলনায় বেশী হয়। পরীক্ষাধীন পদার্থের উষ্ণতা বৃদ্ধি করলে শেষোক্ত রেখাগুলির তীব্রতা কিছুটা বৃদ্ধি পায়।

(ঙ) রামন রেখাগুলি সাধারণতঃ সমবর্তিত (Polarized) হয়। সমবর্তনের পরিমাণ বিভিন্ন ক্ষেত্রে বিভিন্ন হয়।

(চ) উপরে উল্লেখ করা হয়েছে যে রামন ক্রিয়ার উৎপত্তি হয় আপতিত বিকিরণের বিক্ষেপের (Scattering) ফলে। এই বিক্ষেপের প্রকৃতি কিন্তু সাধারণ র‍্যালে বিক্ষেপ থেকে সম্পূর্ণ ভিন্ন হয়। র‍্যালে বিক্ষেপের ক্ষেত্রে বিক্ষিপ্ত আলোকের তরঙ্গদৈর্ঘ্য অপরিবর্তিত থাকে। অপরপক্ষে রামন বিক্ষেপের ক্ষেত্রে বিক্ষিপ্ত আলোকের তরঙ্গদৈর্ঘ্যের পরিবর্তন ঘটে। র‍্যালে বিক্ষেপের ক্ষেত্রে বিক্ষিপ্ত আলোকের তীব্রতা ($I$) তরঙ্গদৈর্ঘ্যের উপর নির্ভরশীল হয় ($I \propto 1/\lambda^4$) ; ক্ষুদ্রতর তরঙ্গদৈর্ঘ্যের আলোক বেশী পরিমাণে বিক্ষিপ্ত হয়। উদাহরণস্বরূপ বাতাসের অণুগুলি থেকে বিক্ষেপের ফলে ক্ষুদ্রতর তরঙ্গদৈর্ঘ্য সম্পন্ন নীল বর্ণের আলোক অন্যান্য বর্ণের আলোক অপেক্ষা বেশী বিক্ষিপ্ত হয়। এই কারণেই আমরা আকাশের নীলিমা দেখি। রামন বিক্ষেপের ক্ষেত্রে বিক্ষিপ্ত আলোকের তরঙ্গদৈর্ঘ্য এবং তীব্রতার মধ্যে উপরোক্ত প্রকার কোন গাণিতিক সম্পর্ক পাওয়া যায় না।

(ছ) প্রতিপ্রভ-বিক্ষেপের (Fluorescent Scattering) সংগে রামন বিক্ষেপের কিছুটা বাহ্যিক সাদৃশ্য থাকলেও দুটি সংঘটন মূলতঃ সম্পূর্ণ বিভিন্ন প্রকৃতির। এদের পার্থক্য সম্বন্ধে উপরে আলোচনা করা হয়েছে।

## 9·7 রামন ক্রিয়ার সনাতন তত্ত্ব

সনাতন তড়িৎচুম্বকীয় তত্ত্ব (Classical Electromagnetic Theory) থেকে রামন ক্রিয়ার উৎপত্তির কারণ মোটামুটিভাবে বোঝা যায়। যদি $\nu$ কম্পাংক সম্পন্ন তড়িৎচুম্বকীয় তরঙ্গ কোন অণুর উপর আপতিত হয়, তাহলে উক্ত তরঙ্গের অন্তর্গত পরিবর্তী তড়িৎক্ষেত্র $E = E_0 \cos 2\pi\nu t$ অণুটির মধ্যে দ্বিমেরু-ভ্রামক (Dipole Moment) আবিষ্ট করে, যার মান হয়

$$p = \alpha E_0 \cos 2\pi\nu t$$

$\alpha$ হচ্ছে সমবর্তিতা-গুণাংক (Polarizability)। সাধারণতঃ $\alpha$ একটি ধ্রুবক সংখ্যা হয়। কিন্তু এক্ষেত্রে $\alpha$ ধ্রুবক হয় না। অণুটির আবর্তন এবং স্পন্দন গতির জন্য সময়ের সংগে $\alpha$ পরিবর্তিত হতে থাকে। এই পরিবর্তনের কারণ সহজভাবে নিম্নলিখিত উপায়ে বোঝা যায়। দ্বিমেরু-ভ্রামকের মান নির্ভর করে দ্বিমেরুর (Dipole) প্রত্যেক মেরুর আধান এবং মেরু দুটির মধ্যের দূরত্বের উপর। অণুর স্পন্দনের ফলে এই দূরত্ব ক্রমাগত পরিবর্তিত হতে থাকে। কাজেই দ্বিমেরু-ভ্রামকও পরিবর্তিত হয়, অর্থাৎ সমবর্তিতা গুণাংক $\alpha$ স্পন্দন কম্পাংক সহকারে সরল সমঞ্জস ভাবে পরিবর্তিত হয়। যদি অণু মধ্যস্থ স্পন্দন ( বা আবর্তন ) কম্পাংক হয় $\nu_1$, তাহলে সাধারণভাবে লেখা যায়

$$\alpha = \alpha_0 + \alpha_1 \cos(2\pi\nu_1 t + \delta)$$

এখানে $\delta$ হচ্ছে স্পন্দনের দশা (Phase)। সুতরাং দ্বিমেরু-ভ্রামক হবে

$$\begin{aligned} p &= [\alpha_0 + \alpha_1 \cos(2\pi\nu_1 t + \delta)]\, E_0 \cos 2\pi\nu t \\ &= \alpha_0 E_0 \cos 2\pi\nu t \\ &\quad + \tfrac{1}{2}\alpha_1 E_0[\cos\{2\pi(\nu+\nu_1)t + \delta\} \\ &\quad + \cos\{2\pi(\nu-\nu_1)t - \delta\}] \qquad (9{\cdot}15) \end{aligned}$$

সমীকরণ (9·15) অনুসারে দ্বিমেরু-ভ্রামকের পরিবর্তন তিনটি বিভিন্ন কম্পাংক সম্পন্ন সরল সমঞ্জস পরিবর্তনের অধ্যারোপণের (Superposition) ফলে সৃষ্ট হয় বলে মনে করা যেতে পারে। এই কম্পাংক তিনটি হচ্ছে $\nu$, $\nu + \nu_1$ এবং $\nu - \nu_1$; এদের মধ্যে প্রথমটি হচ্ছে আপতিত আলোকের আদি কম্পাংক, অন্য দুটি অণুর স্পন্দনের ( বা আবর্তনের ) জন্য

সৃষ্ট হয়। তড়িৎচুম্বকীয় তত্ত্ব অনুযায়ী একটি স্পন্দনশীল তাড়িত-দ্বিমেরু (Electric Dipole) নিজ স্পন্দন কম্পাংক সম্পন্ন তড়িৎচুম্বকীয় তরঙ্গ নিঃসৃত করে। স্পষ্টতঃ এক্ষেত্রে অণুটি $\nu$, $\nu+\nu_1$ এবং $\nu-\nu_1$, এই তিনটি কম্পাংক সম্পন্ন আলোক নিঃসৃত করে। এদের মধ্যে প্রথমটি হচ্ছে আপতিত আলোকের কম্পাংক। অন্য দুটি হচ্ছে যথাক্রমে রামন বর্ণালীতে প্রাপ্ত বিপরীত ষ্টোক্‌স্ এবং ষ্টোক্‌স্ বর্ণালীরেখাদ্বয়ের কম্পাংক। স্পষ্টতঃ উৎপাদক বর্ণালীরেখা থেকে এই দুটির কম্পাংক ব্যবধান ($\Delta\nu=\nu_1$) অণুর স্পন্দন ( বা আবর্তন ) কম্পাংকের সমান। ইতিপূর্বে দেখা গেছে যে অণু থেকে নিঃসৃত বিকিরণের বর্ণালীর মধ্যে এইরূপ কম্পাংক সম্পন্ন বর্ণালীরেখা দেখা যায়। এই রেখাগুলি অবলোহিত অঞ্চলে অবস্থিত থাকে।

তড়িৎচুম্বকীয় তত্ত্ব থেকে যদিও রামন বর্ণালীর উৎপত্তির কারণ মোটামুটি ভাবে বোঝা যায়, রামন রেখাগুলির তীব্রতা (Intensity), সমবর্তিতা (Polarization) ইত্যাদি এই তত্ত্বের সাহায্যে ব্যাখ্যা করা যায় না।

### 9·8 : রামন ক্রিয়ার কোয়ানটাম তত্ত্ব

কোয়ানটাম তত্ত্বের ভিত্তিতে রামন ক্রিয়ার একটি সরল তত্ত্ব উদ্ভাবিত করেন স্মেকাল (Smekal) নামক বিজ্ঞানী ১৯২৩ সালে, অর্থাৎ রামন ক্রিয়া আবিষ্কারের কয়েক বছর আগে। এই তত্ত্ব অনুসারে যখন একটি $h\nu$ শক্তি সম্পন্ন আলোক ফোটন কোন অণুর উপর আপতিত হয়, তখন ফোটন এবং অণুটির মধ্যে নিম্নলিখিত তিন প্রকার বিক্রিয়া ঘটতে পারে : (ক) ফোটনটি অণুর কোয়ানটাম অবস্থার (Quantum State) কোন পরিবর্তন সৃষ্টি না করে বিক্ষিপ্ত হতে পারে, যায় ফলে বিক্ষিপ্ত ফোটনটির শক্তি বা কম্পাংকের কোন পরিবর্তন হয় না ; (খ) ফোটনটি আপন শক্তির স্বল্পাংশ ভৌমস্তরে (Ground State) অবস্থিত অণুটিকে প্রদান করে, যার ফলে অণুটি উচ্চতর শক্তিস্তরে সংক্রমিত হয় এবং ফোটনটির শক্তি কমে যায় ; (গ) অণুটি যদি আদি অবস্থায় উচ্চতর শক্তিস্তরে অবস্থান করে তাহলে ফোটনটি অণু থেকে কিছুটা শক্তি সংগ্রহ করে, যার ফলে অণুটি শক্তি হারিয়ে ভৌমস্তরে সংক্রমিত হয় এবং ফোটনটির শক্তি বৃদ্ধি পায়। প্রথম ক্ষেত্রে ফোটন ও অণুর মধ্যে স্থিতিস্থাপক সংঘাত ঘটে বলে মনে করা যায়, এবং এক্ষেত্রে বিক্ষিপ্ত ফোটনের কম্পাংক আদি কম্পাংকের সমান হয়। দ্বিতীয় এবং তৃতীয় ক্ষেত্রে ফোটন ও অণুর মধ্যে অস্থিতিস্থাপক (Inelastic) সংঘাত ঘটে এবং তার ফলে ফোটনের

কম্পাংক হয় কমে যায় ( ষ্টোক্‌স্ রেখা ) না হয় বৃদ্ধি পায় ( বিপরীত ষ্টোক্‌স্ রেখা )।

যদি প্রাথমিক অবস্থায় অণুটির অন্তর্নিহিত (Intrinsic) শক্তির মান হয় $W_1$, ফোটনের সংগে বিক্রিয়ার পরে এই শক্তির মান হয় $W_2$ এবং বিক্ষিপ্ত ফোটনের শক্তি হয় $h\nu'$, তাহলে শক্তি সংরক্ষণ সূত্র অনুযায়ী পাওয়া যায়

$$W_1 + h\nu = W_2 + h\nu' \tag{9·16}$$

(9·16) সমীকরণে ধরে নেওয়া হয়েছে যে অণু এবং ফোটনের মধ্যে সংঘাতের ফলে অণুটির গতিশক্তির কোন পরিবর্তন হয় না।

সমীকরণ (9·16) থেকে পাওয়া যায়

$$\nu' = \nu + \frac{W_1 - W_2}{h} \tag{9·17}$$

যদি $W_1 = W_2$ হয়, অণুর অন্তর্নিহিত শক্তি অপরিবর্তিত থাকে, এবং $\nu' = \nu$ হয় ; অর্থাৎ বিক্ষিপ্ত বিকিরণের কম্পাংক আদি কম্পাংকের সমান হয়। যদি $W_1 < W_2$ হয়, অণুটি নিম্নতর শক্তিস্তর থেকে উচ্চতর শক্তিস্তরে সংক্রমণ করে, এবং $\nu' < \nu$ হয়, অর্থাৎ বিক্ষিপ্ত বিকিরণের কম্পাংক হ্রাস পায় এবং ষ্টোক্‌স্ রেখার সৃষ্টি হয়। অবশেষে যদি $W_1 > W_2$ হয়, তাহলে অণুটি উচ্চতর শক্তিস্তর থেকে নিম্নতর স্তরে সংক্রমিত হয়, এবং $\nu' > \nu$ হয়, অর্থাৎ বিক্ষিপ্ত বিকিরণের কম্পাংক বৃদ্ধি পায় এবং বিপরীত ষ্টোক্‌স্ রেখার সৃষ্টি হয়। স্পষ্টতঃ উৎপাদক কম্পাংক থেকে ষ্টোক্‌স্ বা বিপরীত ষ্টোক্‌স্ রেখার কম্পাংক ব্যবধান হয়

$$\Delta\nu = \nu' - \nu = \frac{W_1 - W_2}{h}$$

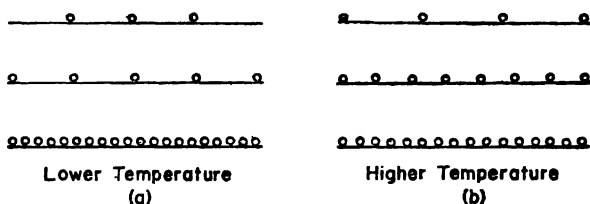
এই ব্যবধান অণুর শক্তিস্তরগুলির উপর নির্ভর করে, আদি কম্পাংকের উপর নির্ভর করে না।

ম্যাক্‌সওয়েল-বোল্‌ৎসমান সংখ্যায়ন অনুযায়ী $T^0$ কেল্‌ উষ্ণতা বিশিষ্ট কোন গ্যাসের মধ্যে $W$ শক্তিস্তরে অবস্থিত অণুর সংখ্যা হয়

$$n = CNge^{-W/kT}$$

এখানে $N$ হচ্ছে গ্যাস অণুগুলির মোট সংখ্যা, $k$ হচ্ছে বোল্‌ৎসমান ধ্রুবক।

$g$ সংখ্যাটিকে বলা হয় সাংখ্যায়নিক-ভার (Statistical Weight), যা সাধারণতঃ অণুর ঘূর্ণন কোয়ানটাম সংখ্যার উপরে নির্ভর করে। $C$ হচ্ছে একটি ধ্রুবক। স্পষ্টতঃ অণুর শক্তি $W$ যত বেশী হয়, $n$ তত কম হয়। নিম্নতম স্তরে, অর্থাৎ ভৌমস্তরে অবস্থিত অণুর সংখ্যা উচ্চতম হয়।

সাধারণ উষ্ণতায় বেশীর ভাগ অণুই ভৌম স্তরে থাকে, ফলে বেশীর ভাগ ক্ষেত্রেই $W_2 > W_1$ হয়, এবং ষ্টোক্‌স্ রেখা সৃষ্টির সম্ভাব্যতাই অপেক্ষাকৃত অনেক বেশী হয়। অণুর আবর্তনের বা স্পন্দনের ফলে কিছু কিছু আণবিক শক্তিস্তর থাকে যাদের শক্তি ভৌম অবস্থার শক্তি অপেক্ষা সামান্য বেশী হয়। তাপীয় গতির প্রভাবে অল্প সংখ্যক অণু সাধারণ উষ্ণতায় এইসব অল্প শক্তি সম্পন্ন উচ্চতর শক্তিস্তরে উন্নীত হয়ে যায়। আপতিত ফোটনের সংগে অস্থিতিস্থাপক সংঘাতের ফলে এই সব অণু নিম্নতর

চিত্র 9·9

বিভিন্ন আণবিক শক্তিস্তরে অবস্থিত অণুর সংখ্যা। উচ্চতর উষ্ণতায় উপরের স্তরে অণুর সংখ্যা বৃদ্ধি লক্ষণীয়।

শক্তিস্তরে সংক্রমিত হতে পারে, যার ফলে বিপরীত ষ্টোক্‌স্ রেখার সৃষ্টি হয়। স্পষ্টতঃ এইরূপ সংক্রমণের সম্ভাব্যতা অপেক্ষাকৃত কম হয়, যার ফলে বিপরীত-ষ্টোক্‌স্ রেখাগুলি তীব্রতা ষ্টোক্‌স্ রেখার তুলনায় অনেক কম হয়। উষ্ণতা বৃদ্ধি করলে উপরোক্ত উচ্চতর শক্তিস্তরে উন্নীত অণুর সংখ্যা বৃদ্ধি পায় এবং বিপরীত ষ্টোক্‌স্ রেখার তীব্রতাও বৃদ্ধি পায় ( 9·9 চিত্র দ্রষ্টব্য )।

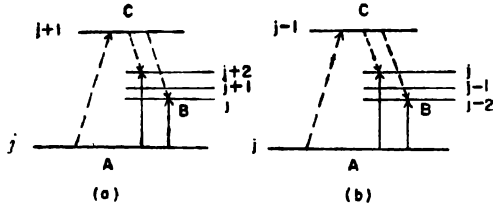
রামন ক্রিয়া একটি অত্যন্ত গুরুত্বপূর্ণ আবিষ্কার। এই ক্রিয়া সম্পর্কিত পরীক্ষা থেকে অণুর গঠন সম্বন্ধে নানারূপ প্রয়োজনীয় তথ্য সংগ্রহ করা যায়। যেহেতু রামন রেখাগুলি দৃশ্যমান অঞ্চলে অবস্থিত থাকে, রামন ক্রিয়া সংক্রান্ত পরীক্ষা অপেক্ষাকৃত অনেক সহজে অনুষ্ঠিত করা যেতে পারে। অণুর অবলোহিত অঞ্চলের বর্ণালী থেকে অণুর গঠন সম্বন্ধে যে সব তথ্য জানা সম্ভব,

রামন ক্রিয়া থেকে সেই সব তথ্যই আরও অনেক সহজতর উপায়ে পাওয়া যায়।

রামন রেখাগুলির উৎপত্তি কতকগুলি নির্বাচন সূত্র দ্বারা নির্ধারিত হয়। এগুলি সাধারণতঃ শুদ্ধ আবর্তন বর্ণালী বা আবর্তন-স্পন্দন বর্ণালী উৎপাদক নির্বাচন সূত্রগুলি ( সমীকরণ 9·6 ও 9·12) থেকে পৃথক হয়। উদাহরণস্বরূপ, রামন ক্রিয়ার ফলে যদি দুটি শুদ্ধ আবর্তন শক্তিস্তরের মধ্যে সংক্রমণ ঘটে, তাহলে সাধারণতঃ $\Delta j = \pm 2$ নির্বাচন সূত্রটি প্রযোজ্য হয়। এই সূত্র শুদ্ধ আবর্তন রেখা উৎপাদক নির্বাচন সূত্র ($\Delta j = \pm 1$) থেকে পৃথক। ফলে অনেক ক্ষেত্রে রামন রেখা উৎপন্ন হলেও সংশ্লিষ্ট অবলোহিত শোষণ পটি উৎপন্ন হয় না। আবার কোন কোন ক্ষেত্রে শেষোক্ত পটি উৎপন্ন হলেও সংশ্লিষ্ট রামন রেখাগুলি দেখা যায় না। এইসব ক্ষেত্রে রামন বর্ণালী এবং সংশ্লিষ্ট অবলোহিত শোষণ বর্ণালী নিরীক্ষণ করে আণবিক শক্তিস্তর সম্বন্ধে অনেক প্রয়োজনীয় তথ্য জানা যায়।

নিম্ন বিচ্ছুরণ ক্ষমতা বিশিষ্ট বর্ণালীলেখ দ্বারা নিরীক্ষণ করলে, রামন বর্ণালীতে শুধু ষ্টোক্‌স্ রেখা দেখা যায়, বিপরীত ষ্টোক্‌স্ রেখা দেখা যায় না। এক্ষেত্রে আদি ও ষ্টোক্‌স্ রেখার তরঙ্গসংখ্যা-পার্থক্য পরীক্ষাধীন অণুর স্পন্দন পটির তরঙ্গসংখ্যার সংগে মিলে যায়। কারণ আপতিত ফোটনের সংঘাতে নিম্ন স্তরে অবস্থিত অণুগুলি উচ্চতর স্পন্দন স্তরে সংক্রমিত হয়। যেহেতু উচ্চতর শক্তি সম্পন্ন স্পন্দন স্তরে অবস্থিত অণুর সংখ্যা নগণ্য হয়, সেজন্য এর বিপরীত প্রক্রিয়াটি ঘটতে পারে না ; যার ফলে বিপরীত ষ্টোক্‌স্ রেখা দেখা যায় না। অপরপক্ষে উচ্চ বিচ্ছুরণ ক্ষমতা বিশিষ্ট বর্ণালীলেখ দ্বারা পরীক্ষা করলে ষ্টোক্‌স্ এবং বিপরীত ষ্টোক্‌স্ উভয় প্রকার রেখাই দেখা যায়। আদি রেখা থেকে রামন রেখাগুলির তরঙ্গসংখ্যা-ব্যবধান এক্ষেত্রে খুব কম হয়, কারণ আপতিত ফোটনের সংঘাতে অণুগুলি বিভিন্ন আবর্তন স্তরে সংক্রমিত হয়। এক্ষেত্রে প্রযোজ্য নির্বাচন সূত্র $\Delta j = 0, \pm 2$ পাওয়া যায়।

রামন ক্রিয়ার আধুনিক কোয়ানটাম বলবিদ্যা তত্ত্বে কল্পনা করা যায় যে আপতিত আলোকের প্রভাবে অণুটি প্রথমে আদি শক্তি অবস্থা A থেকে একটি অন্তর্বর্তী শক্তি অবস্থায় সংক্রমিত হয়। পরে এই অন্তর্বর্তী C অবস্থা থেকে B চরম অবস্থায় সংক্রমণ ঘটে ( 9·10 চিত্র দ্রষ্টব্য )। A থেকে

C এবং C থেকে B, এই দুই সংক্রমণই অনুমোদিত সংক্রমণের ক্ষেত্রে প্রযোজ্য নির্বাচন সূত্র ($\Delta j = \pm 1$) দ্বারা নির্ধারিত হয়। এই জাতীয় সংক্রমণকে কাল্পনিক সংক্রমণ (Virtual Transition) আখ্যা দেওয়া হয়। বাস্তব

চিত্র 9·10
রামন বর্ণালী উৎপাদনকারী সংক্রমণ।

ক্ষেত্রে যদিও এইরূপ সংক্রমণ ঘটে না, তথাপি তাত্ত্বিক প্রয়োজনে রামন ক্রিয়া উপরোক্ত দুই প্রকার সংক্রমণের মাধ্যমে ঘটে বলে কল্পনা করলে রামন রেখাগুলির তীব্রতা, সমবর্তিতা ইত্যাদি এই তত্ত্বের সাহায্যে নিরূপণ করা যায়। তাছাড়া রামন ক্রিয়ার ক্ষেত্রে প্রযোজ্য নির্বাচন সূত্রগুলিও এই তত্ত্বের সাহায্যে সহজেই ব্যাখ্যা করা যায়।

(9·10) চিত্র থেকে দেখা যায় যে প্রথমে $j$ আবর্তন কোয়ানটাম সংখ্যা সম্পন্ন আদি শক্তি স্তর A থেকে $j+1$ ( অথবা $j-1$ ) কোয়ানটাম সংখ্যা সম্পন্ন অন্তর্বর্তী C স্তরে কাল্পনিক সংক্রমণ ঘটে। এরপরে C স্তর থেকে $j$ এবং $j+2$ ( অথবা $j$ এবং $j-2$ ) কোয়ানটাম সংখ্যা সম্পন্ন B চরম শক্তিস্তরে সংক্রমণ ঘটে। সুতরাং মোট ফল হচ্ছে যে $j$ আবর্তন কোয়ানটাম সংখ্যা সম্পন্ন আদি স্তর থেকে $j$, $j \pm 2$ কোয়ানটাম সংখ্যা সম্পন্ন চরম স্তরে সংক্রমণ ঘটে। অর্থাৎ এক্ষেত্রে নির্বাচন সূত্র $\Delta j = 0, \pm 2$ হয়। পরীক্ষার দ্বারাও এই নির্বাচন সূত্রগুলি সমর্থিত হয়। স্পষ্টতঃ নির্বাচন সূত্রের জন্য উপরোক্ত সংক্রমণগুলির কোনটিই অবলোহিত শোষণ বর্ণালীতে ঘটতে পারে না। অবশ্য কোন কোন ক্ষেত্রে শোষণ বর্ণালীতে একই শক্তি ব্যবধান সম্পন্ন অন্য দুটি স্তরের মধ্যে অনুমোদিত নির্বাচন সূত্র ($\Delta j = \pm 1$) দ্বারা নির্ধারিত সংক্রমণ ঘটতে দেখা যায়। এ সব ক্ষেত্রে রামন বর্ণালী রেখাগুলির মধ্যেকার তরঙ্গসংখ্যা-পার্থক্য অবলোহিত শোষণ বর্ণালীর কোন কোন রেখার তরঙ্গ সংখ্যার সংগে সমান হয়। সাধারণতঃ সমেরু অণুর (Polar Molecules) ক্ষেত্রেই এইরূপ ঘটে।

## 9·9. রামন ক্রিয়ার ব্যবহারিক প্রয়োগ :

পূর্বেই উল্লেখ করা হয়েছে যে আণবিক গঠন নির্ণয়ে রামন ক্রিয়ার গুরুত্ব সমধিক। (9·4) অনুচ্ছেদে আমরা দেখেছি যে দ্বিপরমাণুক অণুসমূহের প্রত্যেকটির একটি করে নির্দিষ্ট স্পন্দন কম্পাংক থাকে। হাল্‌কা পরমাণু দ্বারা গঠিত অণুর ক্ষেত্রে এই কম্পাংক সাধারণতঃ বেশী হয় ( 9·8 সমীকরণ দ্রষ্টব্য )। আবার পরমাণুগুলির মধ্যেকার বন্ধনী বল ( 9·8 সমীকরণে $k$ ধ্রুবকটি ) বেশী হলেও এই কম্পাংক বেশী হয়। অর্থাৎ একমাত্রিক বন্ধনী (Single Bond) অপেক্ষা দ্বিমাত্রিক বন্ধনীর (Double Bond) ক্ষেত্রে স্পন্দন কম্পাংক উচ্চতর হয়।

দ্বিপরমাণুক অণুগুলিকে দুই শ্রেণীতে ভাগ করা যায়, সমকেন্দ্রকীয় (Homonuclear) এবং বিষম-কেন্দ্রকীয় (Heteronuclear)। প্রথম শ্রেণীভুক্ত অণুগুলি মেরুহীন (Non Polar) হয়। $H_2$, $N_2$, $O_2$ প্রভৃতি এই শ্রেণীর মধ্যে পড়ে। অপরপক্ষে HCl, HBr, HI প্রভৃতি দ্বিতীয় শ্রেণীভুক্ত অণুগুলি সমেরু (Polar) হয়।

পূর্বেই উল্লেখ করা হয়েছে যে মেরুহীন সমকেন্দ্রকীয় অণুগুলির ক্ষেত্রে অবলোহিত অঞ্চলে অবস্থিত আবর্তন-স্পন্দন শোষণ পটি দেখা যায় না (311 পৃষ্ঠা দ্রষ্টব্য)। কারণ এদের কোন বৈদ্যুতিক দ্বিমেরু-ভ্রামক (Electric Dipole Moment) না থাকায় আপতিত আলোকের তড়িৎক্ষেত্র দ্বারা এরা প্রভাবিত হয় না। একমাত্র রামন বর্ণালী পর্যবেক্ষণ করেই এদের স্পন্দন গতি সংক্রান্ত বিভিন্ন তথ্য পাওয়া যেতে পারে। রামন রেখাগুলির কম্পাংক-ব্যবধান থেকে বিভিন্ন অণুর স্পন্দন কম্পাংক, বন্ধনী বল প্রভৃতি নিরূপণ করা হয়েছে। উদাহরণস্বরূপ রাসেটির পরিমাপ থেকে $H_2$, $N_2$ এবং $O_2$ অণুগুলির স্পন্দন কম্পাংক পাওয়া যায় যথাক্রমে 4162, 2331 এবং 1555 সেমি $^{-1}$। অর্থাৎ হাল্‌কা পরমাণু দ্বারা গঠিত অণুর স্পন্দন কম্পাংক উচ্চতর হয়। এই তথ্য (9·8) সমীকরণ লব্ধ সিদ্ধান্তের সংগে সংগতিপূর্ণ। উল্লেখযোগ্য যে এই সব অণুর উচ্চতর ইলেকট্রনীয় শক্তিস্তর থেকে নিম্নস্তর ইলেকট্রনীয় স্তরের বিভিন্ন স্পন্দনস্তরে সংক্রমণের ফলে অতি-বেগনী ইলেকট্রনীয় পটি উৎপন্ন হয়। এদের এবং রামন রেখাগুলির কম্পাংক ব্যবধানের মধ্যে ভাল সংগতি পাওয়া যায়।

যেহেতু HCl, HBr, HI প্রভৃতি অণুগুলির মধ্যে স্থায়ী বৈদ্যুতিক দ্বিমেরু-ভ্রামক থাকে, সুতরাং এরা আপতিত আলোকের তড়িৎক্ষেত্র দ্বারা

প্রভাবিত হয়, যার ফলে এদের অবলোহিত শোষণ বর্ণালী (Infra Red Absorption Spectrum) পাওয়া যায়। উদাহরণস্বরূপ, HCl অণুর আবর্তন-স্পন্দন শোষণ বর্ণালীতে $\Delta j = \pm 1$ নির্বাচন সূত্র দ্বারা নির্ধারিত পটিগুলি ( তথাকথিত P এবং R শাখা ) দেখা যায়। অপরপক্ষে $\Delta j = 0$, এই নিষিদ্ধ সংক্রমণভুক্ত পটিগুলি ( তথাকথিত Q শাখা ) দেখা যায় না। কিন্তু HCl অণুর রামন বর্ণালীতে এই শেষোক্ত সংক্রমণ দ্বারা উৎপন্ন রেখাগুলি দেখতে পাওয়া যায়। এ ছাড়া $\Delta j = \pm 2$ সংক্রমণ দ্বারা উৎপন্ন রেখাগুলিও দেখা যায়। এদের কোন কোনটির ক্ষেত্রে উৎপাদক রেখা ও রামন রেখাগুলির তরঙ্গসংখ্যা ব্যবধান ($\Delta \bar{\nu}$) আবর্তন-স্পন্দন শোষণ বর্ণালীর কোন কোন রেখার তরঙ্গসংখ্যার সংগে সমান পাওয়া যায়। উদাহরণস্বরূপ, 0-2, 1-3 এবং 2-4 এই রামন রেখাগুলির ক্ষেত্রে $\Delta \bar{\nu}$ সংখ্যাটির মান যথাক্রমে অবলোহিত শোষণ বর্ণালীভুক্ত 3-4, 4-5 এবং 6-7 রেখাগুলির তরঙ্গসংখ্যার সংগে সমান হয়।

এই সব পরীক্ষার দ্বারা অণুগুলির স্পন্দন কম্পাংক এবং বন্ধনী বল নিরূপণ করা হয়েছে।

বহু পরমাণুক অণুর ক্ষেত্রে একাধিক স্পন্দন কম্পাংক থাকে এবং এদের ক্ষেত্রে রামন বর্ণালী খুব জটিল হয়।

## পরিচ্ছেদ—10

# কঠিন পদার্থের প্রকৃতি

### 10·1: সূচনা

পদার্থের তিন প্রকার অবস্থার কথা সুবিদিত—কঠিন, তরল, এবং গ্যাসীয়। এদের মধ্যে কঠিন পদার্থ বলতে সেই সব পদার্থ বোঝায় যাদের দৃঢ়তা (Rigidity) এবং স্থিতিস্থাপকতা (Elasticity) ধর্ম থাকে। অর্থাৎ কঠিন পদার্থের উপর তন্যতা বল (Tensile Force) অথবা মোচড়-জাতীয় বল (Shearing Force) প্রয়োগ করলে তাদের মধ্যে স্থিতিস্থাপকতা জনিত পীড়নের (Stress) সৃষ্টি হয়। ফলে কঠিন পদার্থের নিজস্ব আকৃতি এবং আয়তন থাকে।

কঠিন পদার্থকে সাধারণতঃ দুই ভাগে ভাগ করা যায়—অনিয়তাকার (Amorphous) পদার্থ এবং কেলাসিত (Crystalline) পদার্থ। অনিয়তাকার পদার্থের মধ্যে পরমাণু বা অণুগুলি পরস্পরের সংগে দৃঢ় সংবদ্ধ থাকলেও এদের বিন্যাসের মধ্যে কোন নিয়মানুযায়িতা থাকে না। অর্থাৎ এদের আণবিক বিন্যাস কতকটা তরল পদার্থের আণবিক বিন্যাসের অনুরূপ হয়। সেজন্য এই জাতীয় পদার্থকে অতিশীতলীকৃত (Super Cooled) তরল বলে মনে করা যেতে পারে।

অপরপক্ষে কেলাসিত কঠিন পদার্থের মধ্যে অণু বা পরমাণুগুলির বিন্যাসে একটা নির্দিষ্ট নিয়মানুযায়িতা লক্ষ্য করা যায়। (6·14) অনুচ্ছেদে কেলাসের গঠন সম্বন্ধে আলোচনা কালে দেখা গেছে যে কেলাসের অভ্যন্তরে অণু বা পরমাণুগুলি পর্যায়ক্রমে সাজান থাকে। X-রশ্মিগুচ্ছ বা ইলেকট্রন রশ্মিগুচ্ছের সাহায্যে কেলাসের গঠন নির্ণয় সম্বন্ধে ইতিপূর্বে বিশদভাবে আলোচনা করা হয়েছে। কেলাসের অভ্যন্তরে আণবিক বিন্যাসের এইরূপ নিয়মানুযায়িতা থাকায় কেলাসিত কঠিন পদার্থের বিভিন্ন ভৌত ধর্মের তাত্ত্বিক ব্যাখ্যা অনিয়তাকার কঠিন পদার্থের তুলনায় অপেক্ষাকৃত সহজতর।

### 10·2. ধাতব পদার্থের তড়িৎ-পরিবাহিতা

কঠিন পদার্থের ভৌত ধর্মাবলীর তাত্ত্বিক ব্যাখ্যার প্রথম প্রচেষ্টা হয় বর্তমান শতাব্দীর গোড়ার দিকে। লোরেন্‌ৎস্ (Lorentz), ড্রুড্ (Drude) প্রমুখ

বিজ্ঞানীগণ ধাতব পদার্থের তড়িৎ-পরিবাহিতা ব্যাখ্যা করার জন্য ধাতুর ইলেকট্রন তত্ত্ব উদ্ভাবিত করেন। তাঁরা অনুমান করেন যে ধাতব পদার্থের মধ্যে বহু সংখ্যক মুক্ত ইলেকট্রন থাকে। এই ইলেকট্রনগুলি ধাতু দেহের মধ্যে যদৃচ্ছ বিচরণ করতে পারে (4·10 অনুচ্ছেদ দ্রষ্টব্য)। গ্যাসের মধ্যে অণুসমূহের যদৃচ্ছ (Random) গতির সংগে ধাতব পদার্থের মধ্যে ইলেকট্রনের গতির যথেষ্ট সাদৃশ্য দেখা যায়। গ্যাস অণুগুলির মত ইলেকট্রনগুলিও বিচরণ কালে ধাতব পরমাণু সমূহের সংগে বারবার সংঘাত প্রাপ্ত হতে থাকে। সেজন্য ধাতু মধ্যস্থ ইলেকট্রনগুলিকে 'ইলেকট্রন-গ্যাস' আখ্যা দেওয়া হয়।

সাধারণতঃ ধাতুর মধ্যে ইলেকট্রনগুলি যদৃচ্ছ ভাবে বিচরণ করে। ফলে যদিও সেগুলি আহিত কণিকা, তবুও তড়িৎক্ষেত্র প্রযুক্ত না হলে ধাতুর মধ্যে কোন তড়িৎ প্রবাহ দেখা যায় না। অপরপক্ষে প্রযুক্ত তড়িৎক্ষেত্রের প্রভাবে ইলেকট্রনগুলি যদৃচ্ছ গতি ছাড়া তড়িৎক্ষেত্রাভিমুখে একটা 'প্রবাহ-গতি' (Drift Motion) প্রাপ্ত হয়। এরই ফলে তড়িৎ প্রবাহের সৃষ্টি হয়।

যদি $L$ দৈর্ঘ্য এবং $A$ প্রস্থচ্ছেদ সম্পন্ন একটি ধাতব দণ্ডের দুই প্রান্তের মধ্যে $V$ বিভব প্রভেদ প্রয়োগ করা হয়, তাহলে প্রতিটি ইলেকট্রনের উপর প্রযুক্ত তড়িৎক্ষেত্রজ বল হয়

$$F = \frac{eV}{L}$$

এই বলের প্রভাবে ইলেকট্রনগুলির ত্বরণ হয়

$$f = \frac{F}{m} = \frac{eV}{mL}$$

পূর্বেই উল্লেখ করা হয়েছে যে ইলেকট্রনগুলি ধাতব পরমাণুসমূহের সংগে বারবার সংঘাত প্রাপ্ত হয়। পরপর এইরূপ দুবার সংঘাতের অন্তর্বর্তী কালে প্রতিটি ইলেকট্রন তড়িৎক্ষেত্রের প্রভাবে কিছু পরিমাণ বেগ অর্জন করে। প্রত্যেকবার সংঘাতের ফলে ইলেকট্রনগুলি এই অর্জিত বেগ সম্পূর্ণ হারিয়ে ফেলে। যদি পরপর দুবার সংঘাতের মধ্যে অতিবাহিত সময়ের গড় মান $\tau$ হয়, তাহলে শূন্য বেগ থেকে শুরু করে সংঘাত লাভের ঠিক পূর্ব মুহূর্তে একটি ইলেকট্রন কর্তৃক অর্জিত বেগ হয়

$$v = f\tau = \frac{e}{m} \cdot \frac{V}{L} \cdot \tau$$

সুতরাং পরপর দুবার সংঘাতের মধ্যে ইলেকট্রনটির গড় বেগ হয়

$$v_d = \frac{1}{2}\frac{e}{m}\cdot\frac{V}{L}\cdot\tau$$

এই গড় বেগই হচ্ছে পূর্বোল্লিখিত 'প্রবাহ-বেগ' (Drift Velocity)। যদি ধাতুর মধ্যে ইলেকট্রনের গড় তাপীয় বেগ হয় $\bar{v}$ এবং গড় মুক্তপথ (Mean Free Path) হয় $\lambda$, তাহলে লেখা যায়

$$\tau = \lambda/\bar{v}$$

এখানে ধরে নেওয়া হয়েছে $v_d << \bar{v}$। সুতরাং ইলেকট্রনের প্রবাহ-বেগ হয়

$$v_d = \frac{1}{2}\frac{e}{m}\cdot\frac{V}{L}\cdot\frac{\lambda}{\bar{v}} \qquad (10\cdot1)$$

যদি ধাতুর মধ্যে প্রতি একক আয়তনে মুক্ত সংযোজী-ইলেকট্রনের (Valence Electron) সংখ্যা হয় $n$ তাহলে প্রযুক্ত বিভব প্রভেদের ফলে উৎপন্ন তড়িৎ প্রবাহের মান হয়

$$I = neAv_d = \frac{ne^2A}{2mL}\cdot\frac{\lambda}{\bar{v}}V$$

অপরপক্ষে ওহ্‌মের সূত্র (Ohm's Law) থেকে আমরা জানি যে যদি কোন পরিবাহীর রোধ হয় $R$ তাহলে $I = V/R$ হয়।

সুতরাং আমরা পাই

$$R = \frac{2mL\bar{v}}{ne^2A\lambda} = \rho\frac{L}{A} \qquad (10\cdot2)$$

এখানে $\rho$ হচ্ছে পরিবাহীর রোধ-গুণাংক (Specific Resistance)।

$$\rho = \frac{2m\bar{v}}{ne^2\lambda} \qquad (10\cdot3)$$

পরিবাহীর তড়িৎ-পরিবাহিতা (Conductivity) হবে

$$\sigma = \frac{1}{\rho} = \frac{ne^2\lambda}{2m\bar{v}} \qquad (10\cdot4)$$

আবার একথা সুবিদিত যে তড়িতের সুপরিবাহী পদার্থসমূহ তাপেরও সুপরিবাহী হয়। ধাতব পদার্থের তাপ-পরিবাহিতার মূলেও আছে ধাতু

মধ্যস্থ মুক্ত ইলেকট্রনগুলি। কোন ধাতুর এক প্রান্ত উত্তপ্ত করলে সেই স্থানের মুক্ত ইলেকট্রনগুলির গড় তাপীয় শক্তি (Thermal Energy) বৃদ্ধি পায়। ধাতব পরমাণুগুলির সংগে সংঘাতের ফলে এই শক্তি ক্রমশঃ অন্যান্য অঞ্চলের মুক্ত ইলেকট্রনের মধ্যে সঞ্চারিত হয়। এই তাপ পরিবহণ পদ্ধতি গ্যাসের মধ্যে তাপ পরিবহণ পদ্ধতির অনুরূপ। পদার্থের গতীয় তত্ত্ব (Kinetic Theory) থেকে গ্যাসের তাপ-পরিবাহিতা নিরূপণ করা যায়। অনুরূপ পদ্ধতিতে গতীয় তত্ত্ব থেকে ধাতুর তাপ-পরিবাহিতার মান পাওয়া যায়*

$$K = \tfrac{1}{2} n k \bar{v} \lambda \tag{10·5}$$

এখানে $k = 1.38 \times 10^{-16}$ আর্গ/ডিগ্রী হচ্ছে বোলৎস্‌মান ধ্রুবক। সমীকরণ (10·4) এবং (10·5) থেকে পাওয়া যায়

$$\frac{\sigma}{K} = \frac{ne^2\lambda}{2m\bar{v}} \cdot \frac{}{n k \bar{v} \lambda} = \frac{}{m k \bar{v}^2} \tag{10·6}$$

এখন যদি ধরে নেওয়া যায় যে ধাতু মধ্যস্থ ইলেকট্রন গ্যাসের ক্ষেত্রে ম্যাক্‌স্‌ওয়েলের বেগ-বণ্টন সূত্র (Velocity Distribution Law) প্রয়োগ করা সম্ভব, তাহলে $T^{\circ}$ কেল্‌ উষ্ণতায় গড় তাপীয় বেগ $\bar{v}$ হয়

$$\bar{v} = \sqrt{\frac{8kT}{\pi m}} \tag{10·7}$$

সমীকরণ (10·6) এবং (10·7) থেকে পাওয়া যায়

$$\frac{\sigma}{K} = \frac{e^2}{mk} \cdot \frac{\pi m}{8kT} = \frac{\pi}{8} \cdot \frac{e^2}{k^2 T} \tag{10·8}$$

সমীকরণ (10·8) থেকে দেখা যায় যে ধাতুর তড়িৎ-পরিবাহিতা σ এবং তাপ-পরিবাহিতা $K$ সংখ্যা দুটির অনুপাত হচ্ছে চরম স্কেলে পরিমিত উষ্ণতা $T$ এর ব্যস্তানুপাতিক। স্পষ্টতঃ নির্দিষ্ট উষ্ণতায় ($T$ = ধ্রুবক) $\sigma/K$ অনুপাতটি ধ্রুবক হয়। ভীদেমান এবং ফ্রান্‌ৎস্‌ (Wiedemann and Frantz) নামক দুজন বিজ্ঞানী সর্বপ্রথম পরীক্ষা দ্বারা এই তথ্য আবিষ্কার করেন। সেইজন্য এই তথ্যকে বলা হয় 'ভীদেমান-ফ্রান্‌ৎস্‌ সূত্র' (Wiedemann-Frantz Law)। পরীক্ষা দ্বারা এই সূত্রের সত্যতা

* সাহা এবং শ্রীবাস্তব রচিত A Treatise on Heat পুস্তকের (14·15) অনুচ্ছেদ দ্রষ্টব্য।

মোটামুটিভাবে প্রমাণিত হয়। সুতরাং উপরে আলোচিত ধাতুর ইলেকট্রন তত্ত্বের মৌলিক অনুমানগুলির যথার্থতা সম্বন্ধে সন্দেহের অবকাশ থাকে না।

## 10·3 : লোরেনৎস্-ড্রুড্ সনাতন ইলেকট্রন তত্ত্বের অসম্পূর্ণতা

ভীদেমান-ফ্রান্‌ৎস্ সূত্র প্রতিপন্ন করার সময়ে ধরে নেওয়া হয় যে ইলেকট্রন গ্যাসের ক্ষেত্রে ম্যাক্স্‌ওয়েলের বেগ-বণ্টন সূত্র প্রযোজ্য। কিন্তু উষ্ণতার সংগে ধাতুর তড়িৎ-পরিবাহিতার পরিবর্তন, ধাতুর আপেক্ষিক তাপ প্রভৃতির পরিমাপ থেকে প্রতীয়মান হয় যে এই অনুমান ঠিক নয়।

সমীকরণ (10·7) অনুযায়ী $\bar{v} \propto \sqrt{T}$ হয়। সুতরাং সমীকরণ (10·3) থেকে $\rho \propto \sqrt{T}$ হবে এইরূপ আশা করা যায়। কিন্তু প্রকৃতপক্ষে দেখা যায় যে $\rho \propto T$ (প্রায়) হয়। এই তথ্য উপরে আলোচিত লোরেনৎস্-ড্রুড্ তত্ত্বের পরিপন্থী।

আবার অন্যান্য কঠিন পদার্থের মত যে কোন ধাতুর গ্রাম-পরমাণবিক আপেক্ষিক তাপের (Specific Heat) পরিমিত মান ধ্রুবক হয়। এই মান প্রায় 6 ক্যালরি/গ্রাম-পরমাণু হয়। এই তথ্য 'ডুলং-পেটিট সূত্র' (Dulong-Petit Law) নামে পরিচিত। উপরে আলোচিত ধাতুর সনাতন ইলেকট্রন তত্ত্ব অনুযায়ী কোন ধাতুকে উত্তপ্ত করলে প্রযুক্ত তাপ তিন ভাবে বণ্টিত হতে পারে। ধাতুর মধ্যে পরমাণুগুলি পরস্পরের সংগে দৃঢ় সংবদ্ধ থাকার জন্য সেগুলি একটি নির্দিষ্ট সীমার মধ্যে স্পন্দিত হতে থাকে। ফলে প্রতিটি পরমাণুর কিছু পরিমাণ গতিশক্তি এবং স্থিতিশক্তি থাকে। উত্তাপ প্রয়োগ করলে উভয় প্রকার শক্তিই বৃদ্ধি পায়। তাছাড়া ধাতু মধ্যস্থ মুক্ত ইলেকট্রনগুলিরও প্রত্যেকটির কিছু পরিমাণ গতিশক্তি থাকে। তাপ প্রয়োগের ফলে এই শক্তিও বৃদ্ধি পায়। শক্তির সমবণ্টন সূত্র (Equipartition of Energy) অনুযায়ী $T^{\circ}$ কেল্ উষ্ণতায় প্রত্যেক ধাতব পরমাণুর গড়ে $\frac{3}{2}kT$ গতিশক্তি এবং $\frac{3}{2}kT$ স্থিতিশক্তি থাকে। এখানে $k$ হচ্ছে বোল্‌ৎস্‌মান ধ্রুবক। তাছাড়া প্রতিটি মুক্ত ইলেকট্রনেরও গড়ে $\frac{3}{2}kT$ গতিশক্তি থাকে। সুতরাং যদি অনুমান করা যায় যে ধাতুর মধ্যে পরমাণু প্রতি একটি করে মুক্ত ইলেকট্রন আছে এবং যদি $N$ হয় অ্যাভোগেড্রো-সংখ্যা (Avogadro Number), তাহলে $T^{\circ}$ কেল্ উষ্ণতায় প্রতি গ্রাম পরমাণবিক পরিমাণ ধাতুর মোট শক্তি হওয়া উচিত

$$U = N\left(\tfrac{3}{2}kT + \tfrac{3}{2}kT + \tfrac{3}{2}kT\right) = \tfrac{9}{2}RT$$

এখানে $R=Nk$ হচ্ছে সার্বিক গ্যাস ধ্রুবক (Universal Gas Constant), যার মান হচ্ছে $R=8{\cdot}31\times10^7$ আর্গ/ডিগ্রী $=2$ ক্যালরি/ডিগ্রী ( প্রায় )। সুতরাং ধাতুর আপক্ষিক তাপ হওয়া উচিত

$$C_v=\left(\frac{\partial U}{\partial T}\right)_v=\tfrac{9}{2}R=9 \text{ ক্যালরি/গ্রাম-পরমাণু}$$

কিন্তু ধাতুর পরিমিত আপেক্ষিক তাপ মাত্র 6 ক্যালরি/গ্রাম-পরমাণু হয়। অর্থাৎ মুক্ত ইলেকট্রনগুলির অস্তিত্ব উপেক্ষা করলে ধাতুর আপেক্ষিক তাপের যে মান হওয়া উচিত, পরিমিত আপেক্ষিক তাপ তার সংগে সমান হয়।

উপরের আলোচনা থেকে প্রতীয়মান হয় যে যদিও ধাতুর তড়িৎ-পরিবাহিতা এবং তাপ-পরিবাহিতা ব্যাখ্যা করবার জন্য ধাতব পদার্থের মধ্যে ইলেকট্রন গ্যাসের অস্তিত্ব কল্পনা করার প্রয়োজন হয়, ধাতুর আপেক্ষিক তাপ ব্যাখ্যা করার জন্য ইলেকট্রন গ্যাসের অস্তিত্ব সম্পূর্ণ উপেক্ষা করা যায়। আপাতদৃষ্টিতে পরস্পর বিরোধী এই তথ্যগুলির মধ্যে সর্বপ্রথম সামঞ্জস্য বিধান করেন পাউলি এবং সমারফেল্ড (Pauli and Sommerfeld) নামক বিজ্ঞানীদ্বয়।

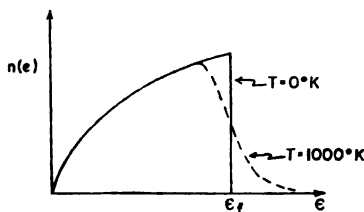
## 10·4: ধাতুর আপেক্ষিক তাপের সঠিক ব্যাখ্যা; পাউলি-সমারফেল্ড তত্ত্ব

পাউলি এবং সমারফেল্ড অনুমান করেন যে সনাতন ইলেকট্রন তত্ত্বে ধাতু মধ্যস্থ ইলেকট্রন গ্যাসের ক্ষেত্রে শক্তি-বণ্টন সূত্র হিসাবে যে ম্যাকস্ওয়েল-বোলৎস্মান সংখ্যায়ন (Maxwell Boltzmann Statistics) প্রয়োগ করা হয় তা বস্তুতঃ সেক্ষেত্রে প্রযোজ্য নয়। তাঁদের মতে কোয়ানটাম তত্ত্বের ভিত্তিতে উদ্ভাবিত ফের্মি-ডিরাক সংখ্যায়নের (Fermi-Dirac Statistics) সাহায্যে প্রাপ্ত শক্তি-বণ্টন সূত্র ইলেকট্রন গ্যাসের ক্ষেত্রে প্রয়োগ করা উচিত।

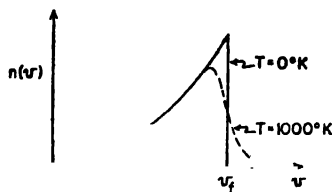
এই তত্ত্ব অনুযায়ী ইলেকট্রন প্রভৃতি যে সকল কণিকা পাউলি অপবর্জন তত্ত্ব (Pauli's Exclusion Principle) মেনে চলে তাদের ক্ষেত্রে ম্যাকস্ওয়েল-বোলৎস্মান সূত্রের পরিবর্তে নিম্নলিখিত শক্তি-বণ্টন সূত্র প্রযোজ্য

$$n(\varepsilon)d\varepsilon=\frac{8\pi V(2m^3)^{\frac{1}{2}}}{h^3}\cdot\frac{\sqrt{\varepsilon}\,d\varepsilon}{e^{(\varepsilon-\varepsilon_f)/kT}+1} \qquad (10{\cdot}9)$$

এখানে $n(\varepsilon)d\varepsilon$ হচ্ছে $\varepsilon$ এবং $\varepsilon+d\varepsilon$ এই দুই শক্তি সীমার মধ্যে অবস্থিত ইলেকট্রনের সংখ্যা। $V$ হচ্ছে ইলেকট্রন গ্যাসের আয়তন। $\varepsilon_f$ একটি

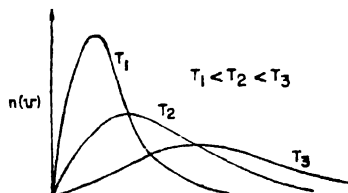
ধ্রুবক ; একে বলা হয় ফের্মি-শক্তি (Fermi Energy)। $m$, $h$ এবং $k$ হচ্ছে যথাক্রমে ইলেকট্রনের ভর, প্ল্যাংক ধ্রুবক এবং বোলৎস্‌মান ধ্রুবক। (10·9) সমীকরণকে বলা হয় ফের্মি-ডিরাক শক্তি-বণ্টন সূত্র (Fermi-Dirac Energy Distribution Law)। (10·1) চিত্রে $T=0°$ কেল্‌

চিত্র 10·1

ফের্মি-ডিরাক শক্তি-বণ্টন চিত্র।

উষ্ণতায় ফের্মি-ডিরাক সূত্র অনুযায়ী প্রাপ্ত শক্তি বিন্যাসের লেখচিত্র প্রদর্শিত হয়েছে। চিত্র থেকে প্রতীয়মান হয় যে 0° কেল্‌ উষ্ণতায় ধাতু মধ্যস্থ ইলেকট্রনগুলির উচ্চতম সম্ভাব্য শক্তির মান $\varepsilon=\varepsilon_f$ হয় ; অর্থাৎ এই শক্তি ফের্মি-শক্তির সমান। ফের্মি-শক্তি অপেক্ষা উচ্চতর শক্তি সম্পন্ন কোন ইলেকট্রন 0° কেল্‌ উষ্ণতায় ধাতুর মধ্যে বর্তমান থাকে না। যদি লেখা যায় $\varepsilon_f=\frac{1}{2}mv_f^2$, তাহলে স্পষ্টতঃ 0° কেল্‌ উষ্ণতায় ধাতু মধ্যস্থ ইলেকট্রনগুলির উচ্চতম সম্ভাব্য বেগের মান $v_f$ হয়। (10·2) চিত্রে ধাতব ইলেকট্রনগুলির

চিত্র 10·2

ফের্মি-ডিরাক বেগ-বণ্টন চিত্র।

বেগ-বণ্টনের লেখচিত্র দেখান হয়েছে। এই চিত্রে নিরবচ্ছিন্ন রেখা দ্বারা অংকিত লেখচিত্রটি 0° কেল্‌ উষ্ণতার জন্য। চিত্র থেকে দেখা যায় যে $v=v_f$ অপেক্ষা উচ্চতর বেগ সম্পন্ন কোন ইলেকট্রন 0° কেল্‌ উষ্ণতায় ধাতুর মধ্যে বর্তমান থাকে না।

উষ্ণতা যথেষ্ট পরিমাণে বৃদ্ধি করলেও ফেৰ্মি-ডিরাক সংখ্যায়ন থেকে প্রাপ্ত বেগ-বণ্টনের খুব সামান্য পরিবর্তন হয়। (10·2) চিত্রে $T = 1000^\circ$ কেল্ উষ্ণতার জন্য সম্ভাব্য বেগ-বণ্টন একটি অবচ্ছিন্ন লেখচিত্র দ্বারা প্রদর্শিত হয়েছে। এই চিত্র থেকে প্রতীয়মান হয় যে বেশীর ভাগ ইলেকট্রনের ক্ষেত্রে উষ্ণতা বৃদ্ধি সত্ত্বেও শক্তির কোন পরিবর্তন হয় না। কেবল অল্প সংখ্যক ইলেকট্রন, যাদের শক্তি ফের্মি-শক্তির কাছাকাছি, উষ্ণতা বৃদ্ধির ফলে উচ্চতর শক্তি প্রাপ্ত হয়। এখানে উল্লেখযোগ্য যে ম্যাক্স্ওয়েল-বোলৎস্মান সংখ্যায়নের ভিত্তিতে প্রাপ্ত বেগ-বণ্টন লেখচিত্র উষ্ণতা বৃদ্ধির সংগে সামগ্রিক-ভাবে $v$-অক্ষ ধরে বিস্তৃত হয়ে যায় (10·3 চিত্র দ্রষ্টব্য)।

চিত্র 10·3

বিভিন্ন উষ্ণতায় ম্যাক্সওয়েল-বোল্ৎসমান বেগ-বণ্টন চিত্র।

উপরের আলোচনা থেকে বোঝা যায় ইলেকট্রন গ্যাসের ক্ষেত্রে উষ্ণতা বৃদ্ধি করলেও মুক্ত ইলেকট্রনগুলির গড় গতিশক্তি বিশেষ পরিবর্তিত হয় না। কোন ধাতুর উপর তাপ প্রয়োগ করলে প্রযুক্ত তাপশক্তি ধাতব পরমাণুগুলির গড় গতিশক্তি এবং স্থিতিশক্তি পরিবর্তিত করে ; মুক্ত ইলেকট্রনের গড় গতিশক্তি প্রায় অপরিবর্তিত থেকে যায়। সেজন্য ধাতুর আপেক্ষিক তাপ প্রতিপন্ন করার সময় প্রথমোক্ত দুই প্রকার শক্তি বিবেচনা করলেই চলে। সুতরাং ধাতুর আপেক্ষিক তাপ পাওয়া যায়

$C_v = (\frac{3}{2}k + \frac{3}{2}k)\, N = 3R \approxeq 6$ ক্যালরি/গ্রাম-পরমাণু

পাউলি এবং এবং সমারফেল্ড এইভাবে ফের্মি-ডিরাক কোয়ানটাম সংখ্যায়নের ভিত্তিতে ধাতুর আপেক্ষিক তাপ ব্যাখ্যা করতে সমর্থ হন।

## 10·5 : উষ্ণতার সংগে ধাতুর তড়িৎ-পরিবাহিতা পরিবর্তনের সঠিক ব্যাখ্যা

(10·3) অনুচ্ছেদে দেখা গেছে যে সনাতন সংখ্যায়নের (Classical Statistics) ভিত্তিতে উষ্ণতার সংঙ্গে ধাতুর রোধ-গুণাংক (Specific

Resistance) পরিবর্তনের সঠিক ব্যাখ্যা সম্ভব নয়। উষ্ণতার সংগে রোধ-গুণাংকের একঘাত (Linear) পরিবর্তনের সঠিক ব্যাখ্যা ফের্মি-ডিরাক সংখ্যায়নের সাহায্যে পাওয়া যায়।

আপাতদৃষ্টিতে মনে হতে পারে যে ফের্মি-ডিরাক সংখ্যায়নের সাহায্যে ধাতুর তড়িৎ-পরিবাহিতা বা তাপ-পরিবাহিতার ব্যাখ্যা সম্ভব নয়। কারণ উক্ত তত্ত্ব অনুসারে $0^{\circ}$ কেল্ উষ্ণতায় ধাতু মধ্যস্থ ইলেকট্রনগুলির শক্তি শূন্য স্তর থেকে ফের্মি-স্তর পর্যন্ত বিস্তৃত থাকে। এইরূপ হওয়ার কারণ ইলেকট্রনগুলি পাউলির অপবর্জন তত্ত্ব মেনে চলে। সনাতন সংখ্যায়ন অনুসারে $0^{\circ}$ কেল্ উষ্ণতায় সমস্ত অণু-পরমাণুর শক্তি শূন্য হয়ে যায়। কিন্তু ইলেকট্রন গ্যাসের ক্ষেত্রে এইরূপ হওয়া সম্ভব নয়। কারণ পাউলি তত্ত্ব অনুসারে সব ইলেকট্রন একই শক্তিস্তরে থাকতে পারে না (5·4 অনুচ্ছেদ দ্রষ্টব্য)। বস্তুতঃ ধাতু মধ্যস্থ মুক্ত ইলেকট্রনের সংখ্যা বিপুল হওয়ার জন্য ধাতুর মধ্যে ইলেকট্রনগুলির সম্ভাব্য শক্তিস্তরের সংখ্যাও খুব বেশী হয়। $0^{\circ}$ কেল্ উষ্ণতায় ইলেকট্রনগুলি নিম্নতম শক্তিস্তর থেকে শুরু করে পাউলি তত্ত্ব অনুসারে ক্রমশঃ উচ্চতর স্তরগুলি অধিকার করতে করতে ফের্মি-স্তর পর্যন্ত সমস্ত শক্তিস্তর পূর্ণ করে ফেলে। উষ্ণতা বৃদ্ধি করলে ফের্মি-স্তরের কাছাকাছি অবস্থিত ইলেকট্রনগুলির শক্তি-বণ্টনের পরিবর্তন হয়। অপরপক্ষে সমস্ত নিম্নতর শক্তিস্তরগুলি ইলেকট্রন দ্বারা পূর্ণ থাকার জন্য পাউলি অপবর্জন তত্ত্ব অনুযায়ী এদের মধ্যে কোন ইলেকট্রনই এক স্তর থেকে অন্য স্তরে সংক্রমিত হতে পারে না। ফলে উষ্ণতা বৃদ্ধি সত্ত্বেও ফের্মি-স্তর অপেক্ষা নিম্নতর শক্তিস্তরে অবস্থিত ইলেকট্রনগুলির শক্তি-বণ্টনের বিশেষ কোন পরিবর্তন হয় না। সেজন্য তারা ধাতুর তড়িৎ বা তাপ-পরিবাহিতায় অংশ গ্রহণ করে না। কেবল ফের্মি-স্তরের নিকটবর্তী উচ্চ শক্তিস্তরসমূহে অবস্থিত ইলেকট্রনগুলিই উষ্ণতা বৃদ্ধির সংগে শক্তি অর্জন করে উচ্চতর ইলেকট্রনশূন্য স্তরসমূহে সংক্রমিত হতে পারে। স্পষ্টতঃ এদের সংখ্যা ধাতু মধ্যস্থ মোট সংযোজী ইলেকট্রনের সংখ্যার তুলনায় খুবই কম হয়।

সমীকরণ (10·4) এবং (10·5) থেকে দেখা যায় যে ধাতুর তড়িৎ-পরিবাহিতা এবং তাপ-পরিবাহিতা ধাতুর মধ্যে মুক্ত ইলেকট্রনগুলির 'সংখ্যা-ঘনত্ব' (Concentration) $n$ এর উপর নির্ভর করে। সনাতন ইলেকট্রন তত্ত্বে $n$ এর মান ধাতু মধ্যস্থ পরমাণুগুলির 'সংখ্যা ঘনত্বের' সমান ধরা হয়। কিন্তু ফের্মি-ডিরাক তত্ত্বে $n$ স্পষ্টতঃ অনেক কম। সুতরাং সমীকরণ (10·4)

এবং (10·5) অনুযায়ী ধাতুর তড়িৎ বা তাপ-পরিবাহিতা খুবই কম হওয়া উচিত। এরূপ না হওয়ার কারণ হচ্ছে যে যদিও মুক্ত ইলেকট্রনের সংখ্যা পরমাণু সংখ্যার তুলনায় অল্প তথাপি ধাতু মধ্যে বিচরণ কালে এরা ধাতব অণু বা পরমাণুগুলির সংগে বিশেষ সংঘাত প্রাপ্ত হয় না। $0°$ কেল্ উষ্ণতায় ধাতব পরমাণুগুলি প্রায় স্থির অবস্থায় থাকে মনে করা যায়। সেজন্য ইলেকট্রনগুলির বিচরণ কালে তারা বিশেষ বাধার সৃষ্টি করে না। ফলে ইলেকট্রনগুলির গড় মুক্তপথ $\lambda$ খুব দীর্ঘ হয়। সেজন্য সমীকরণ (10·4) এবং (10·5) অনুসারে $n$ অপেক্ষাকৃত কম হওয়া সত্ত্বেও $\sigma$ এবং $K$ যথেষ্ট উচ্চ হয়। বস্তুতঃ $0°$ কেল্ উষ্ণতায় গড় মুক্তপথ $\lambda$ এত দীর্ঘ হয় যে ধাতুর তড়িৎ এবং তাপ-পরিবাহিতা খুব উচ্চ হয়। উষ্ণতা বৃদ্ধি করলে ধাতব পরমাণুগুলি তাপীয় গতির ফলে ইতস্ততঃ বিচরণ করে। সেজন্য মুক্ত ইলেকট্রনগুলির বিচরণপথে তারা ক্রমবর্ধমান বাধার সৃষ্টি করে। অর্থাৎ উষ্ণতা বৃদ্ধির সংগে মুক্ত ইলেকট্রনগুলির গড় মুক্তপথ $\lambda$ কমতে থাকে। সুতরাং সমীকরণ (10·4) অনুসারে ধাতুর তড়িৎ-পরিবাহিতা $\sigma$ হ্রাস পেতে থাকে। এই সিদ্ধান্ত পরীক্ষালব্ধ তথ্যের সংগে মিলে যায়।

(10·3) সমীকরণ অনুসারে রোধ-গুণাংক $\rho$ ইলেকট্রনগুলির গড় তাপীয় বেগ $\bar{v}$ এর উপরেও নির্ভর করে। ম্যাক্স্ওয়েল-বোলৎস্মান তত্ত্ব অনুসারে $\bar{v} \propto \sqrt{T}$ হয় (সমীকরণ 10·7 দ্রষ্টব্য)। ফের্মি-ডিরাক তত্ত্ব অনুযায়ী কেবল অল্প সংখ্যক উচ্চ শক্তি ইলেকট্রনের মুক্তাবস্থায় বিচরণের ফলে ধাতুর তড়িৎ-পরিবাহিতার উৎপত্তি হয়। এদের গড় তাপীয় বেগ ম্যাক্সওয়েল-বোলৎসমান তত্ত্ব থেকে প্রাপ্ত গড় বেগ অপেক্ষা অনেক বেশী হয়। ফলে এর দ্বারা নির্ধারিত উষ্ণতাও ধাতুর প্রকৃত উষ্ণতা অপেক্ষা অনেক বেশী হয়। বস্তুতঃ যদি ইলেকট্রনগুলির উচ্চতম শক্তি (ফের্মি-শক্তি) $\varepsilon_f = \frac{3}{2} kT_f$ লেখা যায়, তাহলে $T_f$ সংখ্যাটির মান $30{,}000°$ কেল্ বা ততোধিক হয়। ধাতুর প্রকৃত উষ্ণতা $T$ কয়েক সহস্র ডিগ্রী পর্যন্ত বৃদ্ধি করলেও $T_f$ এর উপরোক্ত মানের বিশেষ পরিবর্তন হয় না। অর্থাৎ $T_f$ সংখ্যাটিকে প্রায় ধ্রুবক ধরা যেতে পারে, এবং তার ফলে (10·3) সমীকরণে $\bar{v}$ সংখ্যাটিকেও প্রায় ধ্রুবক ধরা যেতে পারে। সুতরাং উক্ত সমীকরণ অনুসারে কেবল গড় মুক্ত-পথ $\lambda$ পরিবর্তিত হওয়ার জন্যই উষ্ণতার সংগে রোধ-গুণাংক $\rho$ পরিবর্তিত হয়। উপরের আলোচনা থেকে দেখা যায় যে ধাতুর উষ্ণতা $T$ বৃদ্ধি করলে $\lambda$ হ্রাস পেতে থাকে, ফলে $\rho$ বৃদ্ধি পায়। প্রকৃতপক্ষে দেখা যায় যে গড়

মুক্তপথ উষ্ণতার ব্যস্তানুপাতিক হয় ($\lambda \propto 1/T$) ; সুতরাং রোধ-গুণাংক $\rho$ উষ্ণতার সংগে একঘাতে বৃদ্ধি পায় ($\rho \propto T$)। এইভাবে সনাতন ইলেকট্রন তত্ত্বের অন্যতম অসম্পূর্ণতা ফের্মি-ডিরাক তত্ত্বের সাহায্যে বিদূরিত হয়।

এখানে উল্লেখযোগ্য যে তাপীয় ইলেকট্রন নিঃসরণের (Thermionic Emission) ক্ষেত্রে ফের্মি-ডিরাক সংখ্যায়ন প্রয়োগ করে রিচার্ডসন-ডুশ্‌ম্যান সমীকরণ (4·8) প্রতিপাদন করা হয়। এ সম্বন্ধে (4·10) অনুচ্ছেদে আলোচনা করা হয়েছে।

## 10·6 : ফের্মি-শক্তির মান

(10·9) সমীকরণের সাহায্যে ফের্মি-স্তরের শক্তি এবং ধাতু মধ্যস্থ মুক্ত ইলেকট্রনের সংখ্যা ঘনত্ব $n$ এর মধ্যে গাণিতিক সম্পর্ক নির্ণয় করা সম্ভব। সমীকরণ (10·9) থেকে এক ঘন সেমি আয়তনের ক্ষেত্রে সমাকলন করে পাওয়া যায়

$$n = \int_0^{\varepsilon_f} n(\varepsilon) d\varepsilon = \frac{8\pi(2m^3)^{\frac{1}{2}}}{h^3} \int_0^{\varepsilon_f} \frac{\varepsilon^{\frac{1}{2}} d\varepsilon}{e^{(\varepsilon - \varepsilon_f)/kT} + 1}$$

যদি $T = 0°$ কেল্‌ এবং $\varepsilon < \varepsilon_f$ হয়, তাহলে আমরা পাই

$$n = \frac{8\pi(2m^3)^{\frac{1}{2}}}{h^3} \int_0^{\varepsilon_f} \varepsilon^{\frac{1}{2}} d\varepsilon = \frac{16\pi(2m^3)^{\frac{1}{2}}}{3h^3} \varepsilon_f^{\frac{3}{2}}$$

সুতরাং $$\varepsilon_f = \frac{h^2}{8m}\left(\frac{3n}{\pi}\right)^{\frac{2}{3}}$$

বিভিন্ন সংখ্যার মান বসালে পাওয়া যায়

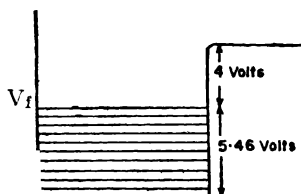
$$\varepsilon_f = 3·64 \times 10^{-15} n^{\frac{2}{3}} \text{ ই-ভো}$$

রুপার ঘনত্ব হচ্ছে প্রায় 10·5 গ্রাম/ঘন সেমি এবং পরমাণবিক ভার হচ্ছে প্রায় $A = 108$ ; সুতরাং এক্ষেত্রে আমরা পাই

$$n = \frac{6·02 \times 10^{23}}{108} \times 10·5 = 5·85 \times 10^{22} \text{ ইলেকট্রন/ঘন সেমি}$$

অতএব রুপার ফের্মি-শক্তিস্তরের মান হয়

$$\varepsilon_f = 3·64 \times 10^{-15} \times (58·5)^{\frac{2}{3}} \times 10^{14} = 5·46 \text{ ই-ভো} \quad (10·10)$$

রুপার নিষ্পাদনীয় কার্য (Work Function) হচ্ছে $\phi \simeq 4$ ভোল্ট। সুতরাং রুপার অভ্যন্তরে অবস্থিত উচ্চতম শক্তি সম্পন্ন মুক্ত ইলেকট্রনগুলি বিভব প্রতিবন্ধকের (Potential Barrier) উপরিতল থেকে প্রায়

চিত্র 10·4

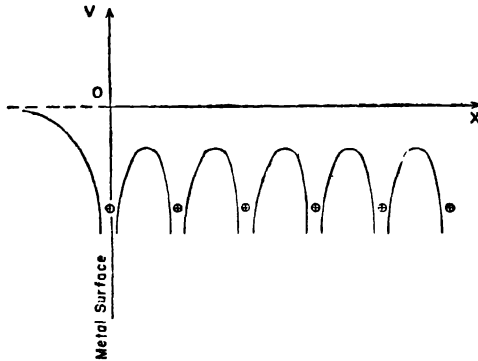
বিভব কূপের মধ্যে রূপার শক্তিস্তর বিন্যাস।

4 ই-ভো নীচে অবস্থিত ফের্মি-শক্তিস্তরে অবস্থান করে। বিভব কূপের নিম্নতম স্তর বিভব প্রতিবন্ধকের উপরিতল থেকে (4 + 5·46) অথবা 9·46 ই-ভো নীচে অবস্থিত থাকে। অর্থাৎ বিভব কূপের গভীরতা 9·46 ভোল্ট হয়। (10·4) চিত্রে রুপার মধ্যেকার শক্তিস্তরগুলির বিন্যাসের নিদর্শন প্রদর্শিত হয়েছে।

এখানে উল্লেখযোগ্য যে যদি ইলেকট্রন গ্যাসের ক্ষেত্রে ম্যাক্স্‌ওয়েল-বোলৎস্‌মান সংখ্যায়ন প্রয়োগ করা যায় তাহলে ধাতুর সব ইলেকট্রনই বিভব প্রতিবন্ধকের উপরিতল থেকে 4 ই-ভো নীচে অবস্থিত শক্তিস্তরে অবস্থান করতে পারে। অর্থাৎ বিভব কূপের গভীরতা সেক্ষেত্রে 9·46 ভোল্ট না হয়ে মাত্র 4 ভোল্ট হবে। (7·4) অনুচ্ছেদে দেখা গেছে যে ইলেকট্রন ব্যবর্তন (Electron Diffraction) পরীক্ষার সাহায্যে ধাতুর বিভব কূপের গভীরতা নির্ণয় করা যায়। এই ভাবে নিরূপিত গভীরতার মান এবং ফের্মি-ডিরাক সংখ্যায়ন থেকে প্রাপ্ত উপরোল্লিখিত উচ্চতর মানের মধ্যে সংগতি পাওয়া যায়। এর থেকে প্রতীয়মান হয় যে ইলেকট্রন গ্যাসের ক্ষেত্রে ম্যাক্স্‌ওয়েল-বোলৎস্‌মান সংখ্যায়নের পরিবর্তে ফের্মি-ডিরাক সংখ্যায়নই প্রয়োগ করা উচিত।

### 10·7 : কঠিন পদার্থের পটি তত্ত্ব; পরিবাহী, অর্ধ-পরিবাহী এবং অন্তরক পদার্থের প্রভেদ :

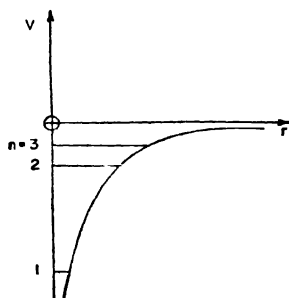
এ পর্যন্ত আমরা ধরে নিয়েছি যে ধাতব পদার্থের মধ্যে সংযোজী ইলেকট্রনগুলি সম্পূর্ণ মুক্ত অবস্থায় বিচরণ করতে পারে। প্রকৃতপক্ষে

সেগুলি ধাতব পরমাণুর কেন্দ্রকগুলি দ্বারা কিছুটা আকৃষ্ট হয়। ধাতব কেলাসের (বা অন্যান্য কেলাসের) মধ্যে অবস্থান পরিবর্তনের সংগে ইলেকট্রনের উপর বিভিন্ন পরমাণু কেন্দ্রকের আকর্ষণ জনিত স্থিতিশক্তি পরিবর্তনের প্রকৃতি (10·5) চিত্রে প্রদর্শিত হয়েছে। যেহেতু ইলেকট্রনগুলির

চিত্র 10·5

ধাতব কেলাসের মধ্যে ইলেকট্রনীয় স্থিতিশক্তির পর্যায়ক্রমে হ্রাস-বৃদ্ধির চিত্ররূপ।

উপর আকর্ষণী বল ক্রিয়া করে, তাদের স্থিতিশক্তি ঋণাত্মক হয়। পরমাণু কেন্দ্রকগুলি যেখানে অবস্থিত থাকে সেখানে স্থিতিশক্তির মান অসীম হয়ে যায়। পাশাপাশি অবস্থিত দুটি পরমাণু কেন্দ্রকের মধ্যবর্তী স্থানে স্থিতি-শক্তির মান উচ্চতম হয়। কারণ এই সব স্থানে ইলেকট্রনগুলির উপর উক্ত কেন্দ্রক দুটির আকর্ষণ সমভাবে ক্রিয়া করে। (10·5) চিত্র থেকে প্রতীয়মান হয় যে কেলাসের মধ্যে ইলেকট্রনের স্থিতিশক্তি পর্যায়ক্রমে হ্রাস বৃদ্ধি পায়।

আধুনিক কোয়ানটাম বলবিদ্যা তত্ত্ব অনুযায়ী যদি একটি কণিকা কোন প্রকার আকর্ষণী বল জনিত বিভব কূপের মধ্যে অবস্থান করে তাহলে কণিকাটির শক্তি কোয়ানটায়িত হয়। উদাহরণস্বরূপ হাইড্রোজেন সদৃশ পরমাণুর ইলেকট্রন কেন্দ্রকের আকর্ষণ জনিত বলের জন্য (10·6) চিত্রে প্রদর্শিত বিভব কূপের মধ্যে অবস্থান করে। কোয়ানটাম বলবিদ্যা তত্ত্ব অনুযায়ী শ্রোডিংগার সমীকরণ সমাধান করলে দেখা যায় যে এক্ষেত্রে ইলেকট্রনটি কতকগুলি অবচ্ছিন্ন (Discrete) শক্তিস্তরে অবস্থান করে।

এই শক্তিস্তরগুলি বোর তত্ত্ব থেকে প্রাপ্ত শক্তিস্তর থেকে অভিন্ন হয় ( 7·11 অনুচ্ছেদ দ্রষ্টব্য )।

চিত্র 10·6

হাইড্রোজেন সদৃশ পরমাণুর মধ্যে কেন্দ্রক থেকে পরিমিত দূরত্বের সংগে ইলেকট্রনীয় স্থিতিশক্তি পরিবর্তনের লেখচিত্র।

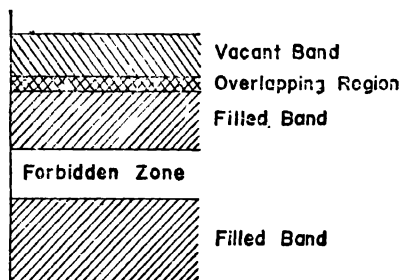
যদি দুটি পরস্পর সংবদ্ধ পরমাণু বিবেচনা করা যায়, তাহলে প্রতিটি পরমাণুর জন্য কতকগুলি অবচ্ছিন্ন শক্তিস্তর পাওয়া যাবে। দুটি পরমাণুর জন্য প্রাপ্ত শক্তিস্তরের সংখ্যা যে কোন একটির ক্ষেত্রে প্রাপ্ত শক্তিস্তরের সংখ্যার দ্বিগুণ হবে। তাছাড়া শক্তিস্তরগুলির শক্তিও পূর্বাপেক্ষা ভিন্ন হবে। কারণ এক্ষেত্রে ইলেকট্রনের স্থিতিশক্তি একটি মাত্র পরমাণুর জন্য প্রাপ্ত স্থিতিশক্তি অপেক্ষা ভিন্ন হয়। এখন পরমাণুর সংখ্যা যদি ক্রমশঃ বৃদ্ধি করা যায়, তাহলে সম্ভাব্য শক্তিস্তরগুলির সংখ্যাও বৃদ্ধি পায়। বস্তুতঃ যদি পরমাণুর সংখ্যা $n$ হয়, তাহলে একটি পরমাণুর জন্য প্রাপ্ত যে কোন শক্তিস্তর $n$ সংখ্যক বিভিন্ন স্তরে বিভাজিত হয়ে যায়। এই বিভাজিত শক্তিস্তরগুলি এত ঘন সন্নিবিষ্ট থাকে যে সেগুলিকে আর অবচ্ছিন্ন শক্তিস্তর বলে বোঝা যায় না। বস্তুতঃ সেগুলিকে এক একটি শক্তির পটি (Band) বলে বোধ হয়। এই পটিগুলিকে 'অনুমোদিত পটি' (Permitted Bands) আখ্যা দেওয়া হয়।

পরপর এইরূপ দুটি পটির মধ্যবর্তী অঞ্চলকে বলা হয় 'নিষিদ্ধ অঞ্চল' (Forbidden Zone)। কেলাসের মধ্যে বর্তমান ইলেকট্রনগুলির সম্ভাব্য শক্তি নিষিদ্ধ অঞ্চলে থাকতে পারে না। এদের শক্তি কেবল অনুমোদিত পটিগুলির অন্তর্গত শক্তির সমান হতে পারে।

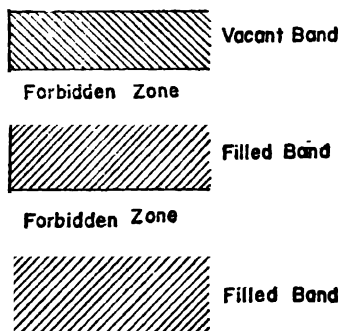
অনুমোদিত পটিগুলির শক্তি বিস্তার নির্ভর করে পটিশক্তির (Band Energy) উপরে এবং কেলাসের মধ্যে পরমাণুগুলির পারস্পরিক দূরত্বের উপরে। কোন ধাতব পরমাণুর (যথা সোডিয়ামের) আভ্যন্তরীণ ইলেকট্রনগুলি নিম্নতর শক্তিস্তরসমূহে অবস্থিত থাকে। ধাতব কেলাসের মধ্যে অবস্থিত এইরূপ একটি পরমাণুর আভ্যন্তরীণ ইলেকট্রনগুলি দৃঢ় সংবদ্ধতার জন্য প্রতিবেশী পরমাণুর অনুরূপ ইলেকট্রনগুলির সংগে বিশেষ বিক্রিয়া করে না। ফলে এদের শক্তিস্তরের শক্তির বিশেষ পরিবর্তন হয় না। সেজন্য নিম্নশক্তি পটিগুলির শক্তি বিস্তার (Energy Spread) অপেক্ষাকৃত কম হয়। অপরপক্ষে দুটি প্রতিবেশী পরমাণুর বহিস্থ কক্ষপথে বর্তমান সংযোজী (Valence) ইলেকট্রনগুলির মধ্যে পারস্পরিক বিক্রিয়া বেশ প্রখর হতে পারে, বিশেষতঃ যখন পরমাণু দুটি খুব কাছাকাছি অবস্থিত থাকে। পরমাণুগুলির মধ্যে এই ইলেকট্রনগুলি উচ্চতর শক্তিস্তরে অবস্থিত থাকে। সুতরাং উচ্চশক্তি পটিগুলির শক্তি বিস্তার অপেক্ষাকৃত বেশী হয়।

উপরে উল্লেখ করা হয়েছে যে পটিগুলির শক্তি বিস্তার কেলাসের পরমাণুগুলির পারস্পরিক দূরত্বের উপরেও নির্ভর করে। যদি $N$ সংখ্যক পরমাণুকে ক্রমশঃ কাছাকাছি নিয়ে আসা হয়, তাহলে তাদের পারস্পরিক বিক্রিয়া ক্রমশঃ বৃদ্ধি পায়। ফলে তাদের যে কোন একটির জন্য নির্দিষ্ট কোন শক্তিস্তর $N$ সংখ্যক স্তরে বিভাজিত হয়ে যায়। পরমাণুগুলি যত কাছাকাছি আসে ততই এই বিভাজন বৃদ্ধি পায় এবং পটির শক্তি বিস্তারও বৃদ্ধি পায়। অবশেষে এমন অবস্থার সৃষ্টি হতে পারে যে পরপর দুটি পটির অন্তর্বর্তী নিষিদ্ধ অঞ্চল বিলোপ পায় এবং পটিগুলি পরস্পরের উপর অধ্যাপতিত হতে পারে। এই অবস্থায় পটিগুলির মধ্যে ইলেকট্রনসমূহের সম্ভাব্য শক্তিস্তর সংখ্যা অনেক বৃদ্ধি পায়।

কেলাসের ইলেকট্রনগুলি নিম্নতম অনুমোদিত পটির নীচের দিক থেকে আরম্ভ করে পাউলি অপবর্জন তত্ত্ব (Exclusion Principle) অনুযায়ী বিভিন্ন শক্তিস্তর অধিকার করে থাকে। নিম্নতম পটি ইলেকট্রন দ্বারা পূর্ণ হবার পর অতিরিক্ত ইলেকট্রনগুলি উচ্চতর অনুমোদিত পটির মধ্যে অনুরূপভাবে নীচের দিক থেকে আরম্ভ করে বিভিন্ন শক্তিস্তরে বিন্যস্ত থাকে। এইভাবে স্বাভাবিক অবস্থায় বিভিন্ন অনুমোদিত নিম্নতর শক্তি সম্পন্ন পটিগুলির মধ্যে কেলাসের মধ্যেকার সব ইলেকট্রন বিন্যস্ত থাকে। এই পটিগুলিকে বলা হয় 'সংযোজী পটি' (Valence Bands)।

যে সব কেলাসের মধ্যে উচ্চতম পটি ইলেকট্রন দ্বারা আংশিকভাবে পূর্ণ থাকে, তাদের উপর সামান্য মাত্র তড়িৎক্ষেত্র প্রয়োগ করলেই কতকগুলি ইলেকট্রন পটি মধ্যস্থ উচ্চতর রিক্ত (Empty) শক্তিস্তরে সংক্রমিত হয়। ফলে সেগুলি কেলাসের মধ্যে একস্থান থেকে অন্যস্থানে স্বচ্ছন্দে বিচরণ করতে

চিত্র 10·7
পরিবাহী পদার্থের শক্তিপটির বিন্যাস।

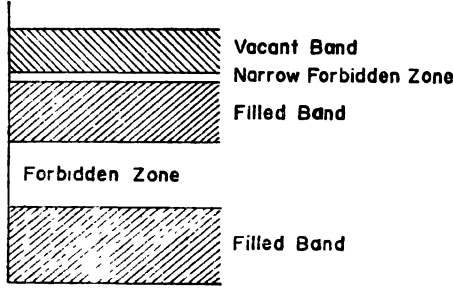
সমর্থ হয় (10·7 চিত্র দ্রষ্টব্য)। স্পষ্টতঃ এই জাতীয় কেলাসের তড়িৎ-পরিবাহিতা খুব উচ্চ হয়। সমস্ত ধাতুই এই শ্রেণীর কেলাসের অন্তর্ভুক্ত।

অপরপক্ষে বেশীর ভাগ অধাতুই তড়িতের কুপরিবাহী, অর্থাৎ তারা

চিত্র 10·8
অন্তরক পদার্থের শক্তিপটির বিন্যাস।

অন্তরক (Insulator) পদার্থ হয়। এদের ক্ষেত্রে উচ্চতম পটিটি সম্পূর্ণভাবে ইলেকট্রন দ্বারা পূর্ণ থাকে। ফলে এই পটির মধ্যে অবস্থিত কোন

ইলেকট্রনেরই একস্তর থেকে অন্য স্তরে যাওয়ার কোনরূপ সম্ভাবনা থাকে না। পরবর্তী সম্পূর্ণ রিক্ত 'পরিবাহী পটিটি' (Conduction Band) পূর্ববর্তী উচ্চতম ইলেকট্রনপূর্ণ পটি থেকে অনেকটা উপরে অবস্থিত থাকে। এদের মধ্যে বেশ প্রশস্ত একটি নিষিদ্ধ অঞ্চল থাকে (10·8 চিত্র দ্রষ্টব্য)। সেজন্য এই জাতীয় পদার্থের উপর তড়িৎক্ষেত্র প্রয়োগ করলেও উচ্চতম পটিতে অবস্থিত ইলেকট্রনগুলি যথেষ্ট পারমাণ শক্তি অর্জন করে নিষিদ্ধ অঞ্চল পার হয়ে পরবর্তী উচ্চতর অনুমোদিত শক্তি পটির মধ্যে সংক্রমিত হতে পারে না। ফলে এদের মধ্যেকার ইলেকট্রনগুলি তড়িৎক্ষেত্র প্রয়োগ করা সত্ত্বেও অচল অবস্থাতেই থেকে যায় এবং এদের মধ্যে কোনরূপ তড়িৎ প্রবাহ উৎপন্ন হয় না। অর্থাৎ এরা তড়িতের কুপরিবাহী হয়। এই জাতীয় পদার্থকে উত্তপ্ত করলেও এদের মধ্যে একস্থান থেকে অন্যস্থানে তাপ পরিবাহিত হয় না। কারণ উচ্চতম শক্তি পটিতে অবস্থিত ইলেকট্রনগুলি উত্তাপ প্রয়োগের ফলে যতটা তাপ শক্তি অর্জন করে তার দ্বারা নিষিদ্ধ অঞ্চল পার হয়ে পরবর্তী অনুমোদিত পটিতে সংক্রমণ করতে সমর্থ হয় না। সেইজন্য এইসব পদার্থ তাপেরও কুপরিবাহী হয়।

উপরোক্ত দুই প্রকার পদার্থ ছাড়া আর একরূপ পদার্থ আছে যাদের বলা হয় 'অর্ধপরিবাহী' (Semi Conductor)। জার্মানিয়াম, সিলিকন, কিউপ্রাস-অক্সাইড, দস্তার অক্সাইড প্রভৃতি এই শ্রেণীর অন্তর্গত। এই জাতীয় পদার্থের মধ্যে অন্তরক পদার্থের মত 0° কেল্‌ উষ্ণতায় উচ্চতম পটিটি সম্পূর্ণভাবে ইলেকট্রন দ্বারা পূর্ণ থাকে। অন্তরক পদার্থের সংগে এদের পার্থক্য এই যে পরবর্তী নিষিদ্ধ অঞ্চলটি এদের ক্ষেত্রে অপেক্ষাকৃত সংকীর্ণতর হয় (10·9 চিত্র দ্রষ্টব্য)। সেজন্য এইসব পদার্থকে অল্প উত্তপ্ত করলেই উচ্চতম সংযোজী পটিতে অবস্থিত কিছু সংখ্যক ইলেকট্রন যথেষ্ট পরিমাণ তাপ শক্তি অর্জন করে নিষিদ্ধ অঞ্চল অতিক্রম করতে সমর্থ হয় এবং তার ফলে উচ্চতর ইলেকট্রনশূন্য অনুমোদিত পরিবাহী পটিতে সংক্রমণ করে। বিভব প্রভেদ প্রয়োগ করলে এইসব ইলেকট্রন পদার্থটির মধ্যে স্বচ্ছন্দে এক স্থান থেকে অন্য স্থানে বিচরণ করতে সমর্থ হয়। উষ্ণতা বৃদ্ধি করলে অধিকতর সংখ্যক ইলেকট্রন পরিবাহী পটিতে সংক্রমিত হয়। অর্থাৎ উষ্ণতা বৃদ্ধির সংগে এই জাতীয় পদার্থের তড়িৎ পরিবাহিতা বৃদ্ধি পায়। ধাতব পদার্থের ক্ষেত্রে ঠিক এর বিপরীত ঘটে। আলোকপাত করলেও অর্ধপরিবাহী পদার্থের পরিবাহিতা বৃদ্ধি পায়।

এখানে উল্লেখযোগ্য যে যখন নিম্নতর সংযোজী পটি (Valance Band) থেকে উচ্চতর পরিবাহী পটিতে (Conduction Band) একটি ইলেকট্রন সংক্রমিত হয় তখন সংযোজী পটির মধ্যে একটি রিক্ততার সৃষ্টি

চিত্র 10·9

অর্ধপরিবাহী পদার্থের শক্তিপটির বিন্যাস।

হয়। ইলেকট্রনের অভাব জনিত এই রিক্ততা সংযোজী পটি মধ্যস্থ অন্য আর একটি ইলেকট্রন প্রযুক্ত বিভব প্রভেদের প্রভাবে এসে পূর্ণ করে ফেলতে সমর্থ হয়। যখন এইরূপ ঘটে তখন সংযোজী পটির মধ্যে আর একটি রিক্ত শক্তিস্তর সৃষ্ট হয়। এই রিক্ততা অন্য আর একটি ইলেকট্রন এসে পূর্ণ করতে পারে। এইভাবে বারবার নবসৃষ্ট রিক্ততাগুলি (Vacancies) একই পটি মধ্যস্থ নূতন নূতন ইলেকট্রন এসে পূর্ণ করতে থাকে এবং সেগুলি ক্রমশঃ ইলেকট্রনের গতির বিপরীত দিকে অপসৃত হতে থাকে। ঠিক যেমন পরপর অনেকগুলি গাড়ী যদি ট্র্যাফিক জ্যামের ফলে রাস্তার উপরে দাঁড়িয়ে থাকে, তাহলে একটি গাড়ী অল্প একটু অগ্রসর হলে যে রিক্ত স্থানের সৃষ্টি হয়, পিছনের গাড়ী এসে সেই স্থানটি অধিকার করে। দ্বিতীয় গাড়ীর স্থানে যে রিক্ততার সৃষ্টি হয়, তার পিছনের গাড়ীটি এগিয়ে এসে তা পূর্ণ করে। ফলে তৃতীয় আর একটি রিক্ত স্থানের সৃষ্টি হয়। অর্থাৎ দূর থেকে দেখলে বোধ হবে যেন কিছুটা রিক্ত স্থান গাড়ীগুলির গতির বিপরীত দিকে ক্রমশঃ অগ্রসর হয়ে চলেছে।

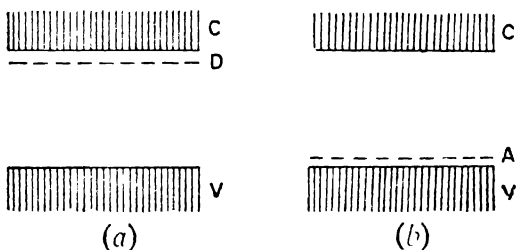
ইলেকট্রনশূন্যতার ফলে উৎপন্ন রিক্ততা ইলেকট্রনের আধানের সমপরিমাণ ধনাত্মক আধানবাহী হয়। এইরূপ ধনাত্মক আধানবাহী রিক্ততাকে 'গহ্বর' (Hole) বলা হয়। স্পষ্টতঃ সংযোজী পটি থেকে পরিবাহী পটিতে ইলেকট্রন

সংক্রমণের ফলে প্রথমোক্ত পটিতে কতকগুলি ধনাত্মক গহ্বরের সৃষ্টি হয়। প্রযুক্ত তড়িৎক্ষেত্রের জন্য অনেক অর্ধপরিবাহী পদার্থের মধ্যে শুধু যে ইলেকট্রনের গতির ফলেই তড়িৎ প্রবাহ উৎপন্ন হয় তা নয়, উপরে বর্ণিত ধনাত্মক গহ্বরগুলির গতির জন্যও কিছুটা তড়িৎ প্রবাহের সৃষ্টি হয়। গহ্বরগুলি অবশ্য ইলেকট্রন অপেক্ষা অনেক মন্থর গতিতে বিচরণ করে। সেজন্য গহ্বর-বিচরণের (Hole Migration) দ্বারা উৎপন্ন তড়িৎ প্রবাহের মান ইলেকট্রনের গতির জন্য উৎপন্ন তড়িৎ প্রবাহ অপেক্ষা কম হয়। ঋণাত্মক ইলেকট্রন এবং ধনাত্মক গহ্বর এদের উভয়কেই বলা হয় বাহক (Carrier)।

## 10·8 : অর্ধপরিবাহী পদার্থের ব্যবহারিক প্রয়োগ ; ট্রানজিস্টার

উপরে আলোচিত অর্ধপরিবাহী পদার্থগুলিকে বিশুদ্ধ বা স্বকীয় অর্ধপরিবাহী (Intrinsic Semi Conductors) বলা হয়। অল্প পরিমাণে অপদ্রব্য (Impurity) মিশ্রিত করে এইরূপ পদার্থের অর্ধপরিবাহিতা ধর্মের সবিশেষ পরিবর্তন সাধন করান সম্ভব। এইরূপ পদার্থকে 'অপদ্রব্য অর্ধপরিবাহী (Impurity Semi Conductor) বলা হয়। এদের মধ্যে জার্মানিয়াম ($Z=32$) এবং সিলিকন ($Z=14$) মৌল দুটি বিশেষভাবে উল্লেখযোগ্য। এগুলি হচ্ছে স্বকীয় অর্ধপরিবাহী। অল্প পরিমাণে অপদ্রব্য মিশ্রিত করে এদের অপদ্রব্য অর্ধপরিবাহীতে রূপান্তরিত করা সম্ভব। এই অবস্থায় খুব নিম্ন উষ্ণতায়ও এগুলির অর্ধপরিবাহিতা ধর্ম প্রকট হয়। ট্র্যানজিসটার নির্মাণের কাজে এগুলি ব্যবহৃত হয়। বর্তমান কালে রেডিয়ো, টেলিভিশন এবং অন্যান্য নানারূপ ইলেকট্রনিক যন্ত্রে ব্যাপকভাবে ট্র্যানজিস্টার ব্যবহার করা হয়। ইলেকট্রনিক ভাল্‌ভের পরিবর্তে ট্র্যানজিস্টার ব্যবহার করার সুবিধা এই যে এগুলি আয়তনে অপেক্ষাকৃত অনেক ক্ষুদ্র হয় এবং এদের ব্যবহারের জন্য খুব কম বৈদ্যুতিক শক্তির প্রয়োজন হয়।

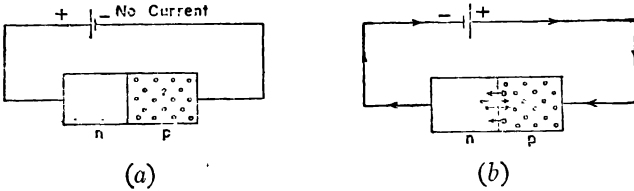
জার্মানিয়াম ও সিলিকন হচ্ছে চতুর্যোজী (Tetravalent) মৌল; অর্থাৎ এদের পরমাণুতে চারটি করে সংযোজী ইলেকট্রন থাকে। ফলে জার্মানিয়াম কেলাসের মধ্যে প্রত্যেকটি পরমাণু চারটি প্রতিবেশী পরমাণুর সংগে দৃঢ়ভাবে সংবদ্ধ থাকে। এই কেলাসের মধ্যে অল্প পরিমাণে অ্যান্টিমনি ($Z=51$) জাতীয় পঞ্চযোজী (Pentavalent) মৌল অথবা গ্যালিয়াম ($Z=31$) জাতীয় ত্রিযোজী (Trivalent) মৌল অপদ্রব্য (Impurity) হিসাবে মিশ্রিত করা হয়। প্রথম ক্ষেত্রে জার্মানিয়াম (বা সিলিকন) কেলাসের মধ্যে কোন কোন জাফরি বিন্দুতে (Lattice Points) চতুর্যোজী

জার্মানিয়ামের পরিবর্তে পঞ্চযোজী অ্যাণ্টিমনি পরমাণু অবস্থিত থাকে। ফলে এই সব স্থানে একটি করে অতিরিক্ত ইলেকট্রন থেকে যায়। এই ইলেকট্রনগুলি খুব সহজেই উচ্চতর পরিবাহী পটিতে সংক্রমিত হয় এবং এদের

চিত্র 10·10
অপদ্রব্য অর্ধপরিবাহীর মধ্যে ($a$) দাতা ও ($b$) গ্রাহক পরমাণুর শক্তিস্তর।

বিচরণের ফলে তড়িৎ প্রবাহের সৃষ্টি হতে পারে। অর্থাৎ এক্ষেত্রে প্রধানতঃ ঋণাত্মক (Negative) ইলেকট্রনগুলিই বাহকের (Carriers) কাজ করে। এই জাতীয় অর্ধপরিবাহীকে '$n$-শ্রেণীর অর্ধপরিবাহী' বলা হয়। পঞ্চযোজী অপদ্রব্য পরমাণুগুলি এক্ষেত্রে 'ইলেকট্রন-দাতা' (Donor) হিসাবে কাজ করে। কঠিন পদার্থের পটিতত্ত্ব অনুযায়ী দাতা পরমাণুর জন্য একটি অতিরিক্ত শক্তিস্তর নিষিদ্ধ অঞ্চলের মধ্যে সৃষ্ট হয়। (10·10$a$) চিত্রে প্রদর্শিত এই স্তর D নিষিদ্ধ অঞ্চলের উপরের দিকে C পরিবাহী পটির ঠিক নিচেই সৃষ্ট হয়। সাধারণ উষ্ণতায় এই স্তরে অবস্থিত অবদ্রব্য পরমাণুর মধ্যস্থ অতিরিক্ত সংযোজী ইলেকট্রনটি সহজেই তাপীয় শক্তির প্রভাবে পরিবাহী পটিতে উন্নীত হয়ে যায়।

অপরপক্ষে গ্যালিয়াম অপদ্রব্য মিশ্রিত কেলাসের মধ্যে কোন কোন জাফরি বিন্দুতে ত্রিযোজী গ্যালিয়াম পরমাণু উপস্থিত থাকে। এদের যোজ্যতা জার্মানিয়াম অপেক্ষা এক একক কম হওয়ার জন্য এই সব বিন্দুতে জাফরি গঠন (Lattice Structure) অসম্পূর্ণ থাকে। কারণ এরা তিনটি প্রতিবেশী পরমাণুর সংঙ্গে সংযুক্ত থাকতে পারে। নিকটস্থ কোন জার্মানিয়াম পরমাণু থেকে একটি ইলেকট্রন এসে এই জাফরি গঠন সম্পূর্ণ করতে পারে। ফলে সংযোজী পটির মধ্যে একটি ইলেকট্রন শূন্য ধনাত্মক গহ্বরের (Hole) সৃষ্টি হয়। সেজন্য এই জাতীয় অর্ধপরিবাহীর মধ্যে এই ধনাত্মক (Positive) গহ্বরগুলিই বাহকের কাজ করে এবং এদের '$p$-শ্রেণীর অর্ধপরিবাহী' বলা হয়। গহ্বরগুলি সংযোজী পটির মধ্যে স্বচ্ছন্দে বিচরণ করতে পারে। যেহেতু অপদ্রব্য

পরমাণুগুলি এক্ষেত্রে ইলেকট্রন গ্রহণ করে, এদের বলা হয় 'গ্রাহক-পরমাণু' (Acceptor Atoms)। পটিতত্ত্ব অনুযায়ী এক্ষেত্রে গ্রাহক পরমাণুর জন্য একটি অতিরিক্ত শক্তিস্তর নিষিদ্ধ অঞ্চলের মধ্যে সৃষ্ট হয়। (10·10*b*) চিত্রে প্রদর্শিত এই স্তর A সংযোজী পটি V এর অল্প উপরে সৃষ্ট হয়। সাধারণ উষ্ণতায় সংযোজী পটি মধ্যস্থ কোন পরমাণু থেকে একটি ইলেকট্রন তাপ শক্তির প্রভাবে এই স্তরে উন্নীত হয়ে উক্ত পটিতে একটি গহ্বরের সৃষ্টি করে।

*n* এবং *p*-শ্রেণীর অর্ধপরিবাহীর সর্বাপেক্ষা সরল ব্যবহারিক প্রয়োগ হচ্ছে একমুখীকারক (Rectifier) প্রস্তুতের ক্ষেত্রে। যদি একটি *n*-শ্রেণীর অর্ধপরিবাহী এবং একটি *p*-শ্রেণীর অর্ধপরিবাহী পরস্পর সংলগ্ন অবস্থায় স্থাপিত থাকে এবং তাদের মধ্যে বিভব প্রভেদ প্রয়োগ করা হয়, তাহলে কেবল নির্দিষ্ট দিকে তড়িৎক্ষেত্র প্রযুক্ত হলেই তবে তড়িৎ প্রবাহ উৎপন্ন হয়। তড়িৎক্ষেত্র বিপরীতমুখী হলে কোন তড়িৎ প্রবাহ উৎপন্ন হয় না। (10·11) চিত্রের সাহায্যে এর কারণ বোঝা যায়। যদি *n*-শ্রেণীর

চিত্র 10·11

অর্ধপরিবাহী পদার্থের একমুখীকরণ ক্রিয়া।

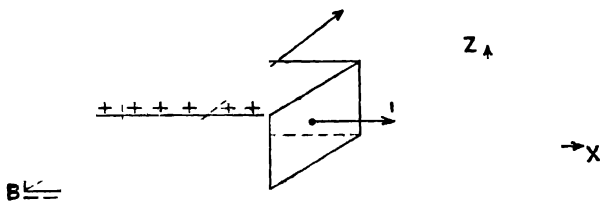
অর্ধপরিবাহীটি একটি তড়িৎ কোষের ধনাত্মক তড়িৎদ্বারের সংগে আর *p* শ্রেণীর অর্ধপরিবাহীটি ঋণাত্মক তড়িৎদ্বারের সংগে সংযুক্ত করা হয়, তাহলে ঋণাত্মক এবং ধনাত্মক উভয় প্রকার বাহকই (Carriers) সংলগ্ন স্তর (Interface) থেকে বিপরীতদিকে অপসৃত হয়ে যায়। ফলে সংলগ্ন স্তরের মধ্য দিয়ে কোন তড়িৎ প্রবাহিত হয় না (10·11*a* চিত্র দ্রষ্টব্য)। অপরপক্ষে যদি *n*-শ্রেণীর অর্ধপরিবাহীকে ঋণাত্মক তড়িৎদ্বারের সংগে এবং *p*-শ্রেণীর অর্ধপরিবাহীকে ধনাত্মক তড়িৎদ্বারের সংগে সংযুক্ত করা হয়, তাহলে দুই প্রকার বাহকই সংশ্লিষ্ট স্তরের মধ্য দিয়ে প্রবাহিত হয়, এবং তড়িৎ প্রবাহের সৃষ্টি হয় (10·11*b* চিত্র দ্রষ্টব্য)।

দুটির পরিবর্তে যদি তিনটি অর্ধপরিবাহী ব্যবহার করা হয়, যথা দুটি ক্ষুদ্র $n$-শ্রেণীর কেসাসের মধ্যে একটি খুব পাতলা $p$-শ্রেণীর কেলাস রাখা যায়, (বা দুটি ক্ষুদ্র $p$-শ্রেণীর কেলাসের মধ্যে যদি একটি খুব পাতলা $n$-শ্রেণীর কেলাস রাখা যায়), তাহলে এই সমন্বয়কে ট্রায়োড ভাল্‌ভের মত পরিবর্ধক (Amplifier), কম্পন-উৎপাদক (Oscillator) প্রভৃতি কাজে ব্যবহার করা যায়।

## 10·9 : হল্‌-ক্রিয়া

যদি কোন গতিশীল আহিত কণিকার গতির অভিলম্বে একটি চৌম্বক ক্ষেত্র প্রয়োগ করা হয়, তাহলে কণিকাটির উপর কিছু পরিমাণ বল প্রযুক্ত হয়। এই বল কণিকাটির গতি এবং চৌম্বক ক্ষেত্র, উভয়ের অভিলম্বে ক্রিয়া করে। যদি $e$ এবং $v$ যথাক্রমে কণিকাটির আধান এবং বেগ হয়, তাহলে $H$ চৌম্বক ক্ষেত্রের জন্য কণিকাটির উপর ক্রিয়াশীল বল $\boldsymbol{v}$ এবং $\boldsymbol{H}$ ভেক্টর দুটির ভেক্টর গুণফলের উপর নির্ভর করে ঃ

$$\boldsymbol{F} = \frac{e}{c}(\boldsymbol{v} \times \boldsymbol{H}) \qquad (10{\cdot}11)$$

পরিবাহী পদার্থের মধ্যে যখন তড়িৎ প্রবাহ উৎপন্ন হয়, তখন তাদের মধ্যে আহিত কণিকাগুলি প্রযুক্ত তড়িৎক্ষেত্রের প্রভাবে এক প্রান্ত থেকে অন্য প্রান্তের

চিত্র 10·12

হল্‌-ক্রিয়া উৎপত্তির চিত্ররূপ।

দিকে প্রবাহিত হয়। স্পষ্টতঃ যদি তড়িৎ প্রবাহের সংগে লম্বভাবে পরিবাহীর উপর একটি চৌম্বক ক্ষেত্র প্রয়োগ করা হয়, তাহলে পরিবাহীর মধ্যে প্রবহমান আহিত কণিকাগুলির উপর উপরোক্ত প্রকার বল ক্রিয়া করে। ফলে কণিকাগুলি তাদের সরলরেখা গন্তব্যপথ থেকে বিচ্যুত হয়ে যায়। (10·12)

চিত্রে পরিবাহী পদার্থের মধ্যে তড়িৎ প্রবাহের উপর উপরোক্ত প্রকার চৌম্বক ক্ষেত্রের ক্রিয়া প্রদর্শিত হয়েছে। চিত্র থেকে প্রতীয়মান হয় যে চৌম্বক ক্ষেত্রের ক্রিয়ার ফলে প্রবহমান আহিত কণিকাগুলি বিচ্যুত হয়ে পরিবাহীর A বা B প্রান্তে জমা হয়। ফলে A এবং B এর মধ্যে একটি বিভব প্রভেদের সৃষ্টি হয়। হল্ (Hall) নামক বিজ্ঞানী ১৮৯৭ খৃস্টাব্দে সর্বপ্রথম পরীক্ষার দ্বারা এই বিভব প্রভেদের নিদর্শন পান। সেইজন্য এই সংঘটনকে হল্-ক্রিয়া (Hall Effect) বলা হয়; উৎপন্ন বিভব প্রভেকে হল্-বিভব (Hall Potential) বলা হয়।

হল্-বিভবের মান সাধারণতঃ খুব কম হয়। সকল পদার্থের ক্ষেত্রে হল্-বিভব প্রভেদের অভিমুখ একরূপ হয় না। সোনা, রুপা, অ্যালুমিনিয়াম প্রভৃতি সুপরিবাহী ধাতুর ক্ষেত্রে হল্-বিভব প্রভেদের অভিমুখ লক্ষ্য করলে দেখা যায় যে এই সব ধাতুর মধ্যে ঋণাত্মক ইলেকট্রন প্রবাহের ফলে তড়িৎ প্রবাহ উৎপন্ন হয়। অপরপক্ষে লোহা, ক্যাডমিয়াম, বেরিলিয়াম প্রভৃতি ধাতুর এবং বিভিন্ন অর্ধপরিবাহীর ক্ষেত্রে হল্-বিভব প্রভেদের অভিমুখ লক্ষ্য করলে মনে হয় যে এদের মধ্যে তড়িৎ প্রবাহ উৎপন্ন হয় কোন ধনাত্মক আহিত কণিকার প্রবাহের ফলে। ধাতুর কোয়ানটাম বলবিদ্যা তত্ত্ব থেকে এই অসংগতির কারণ ব্যাখ্যা করা যায়। আমরা ইতিপূর্বে দেখেছি যে কেলাসের মধ্যে ঋণাত্মক ইলেকট্রন বা ধনাত্মক গহ্বর উভয় প্রকার আধান বাহক (Carrier) থাকতে পারে। যে সব পদার্থের মধ্যে ধনাত্মক গহ্বরের সংখ্যা ঘনত্ব (Concentration) অপেক্ষাকৃত বেশী হয় তাদের ক্ষেত্রে হল্-বিভব প্রভেদ সুপরিবাহী পদার্থের ক্ষেত্রে উৎপন্ন হল্-বিভব প্রভেদের বিপরীতমুখী হয়।

পরীক্ষার দ্বারা দেখা যায় যে উৎপন্ন হল্-বিভব প্রভেদ $\delta V$ নির্ভর করে তড়িৎ প্রবাহ ঘনত্ব (Current Density) $i$, প্রযুক্ত চৌম্বক ক্ষেত্র $H$ এবং A ও B প্রান্তদ্বয়ের ব্যবধান $z$ এর উপরে। অর্থাৎ

$$\delta V \propto iHz$$

সুতরাং $$\delta V = RiHz \qquad (10.12)$$

$R$ একটি ধ্রুবক। একে বলা হয় 'হল্-গুণাংক' (Hall Coefficient) (10.12) সমীকরণ থেকে হল্-বিভব প্রভেদ জনিত তড়িৎক্ষেত্রের মান পাওয়া যায়

$$E_H = \frac{\delta V}{z} = RiH$$

যদি তড়িৎ প্রবাহ সৃষ্টির জন্য দায়ী হয় $e$ আধান সম্পন্ন ইলেকট্রনের গতি, তাহলে প্রতিটি ইলেকট্রনের উপর হল্-ক্ষেত্র জনিত বলের মান হয়

$$F_H = eE_H = eRHi \tag{10.13}$$

সমীকরণ (10.11) থেকে এই বলের মান পাওয়া যায়

$$F_H = \frac{e}{c} vH \tag{10.14}$$

যদি প্রবহমান ইলেকট্রনের সংখ্যা ঘনত্ব $n$ হয়, তাহলে তড়িৎ প্রবাহ ঘনত্ব $i = nev$ হয়। সুতরাং (10.13) ও (10.14) সমীকরণ দুটি থেকে পাওয়া যায়

$$\frac{e}{c} vH = eRHi = eRH.\ nev$$

অতএব
$$R = \frac{1}{nec} \tag{10.15}$$

অর্থাৎ হল্-গুণাংকের মান বাহকের সংখ্যা ঘনত্বের (Carrier Concentration) উপর নির্ভর করে। বাহক ইলেকট্রন হলে $R$ ঋণাত্মক হয়, যথা Li, Na, K, Bi প্রভৃতি ধাতুর ক্ষেত্রে। অপরপক্ষে বাহক যদি ধনাত্মক গহ্বর হয়, তাহলে $R$ ধনাত্মক হয়, যথা Be, Zn, Cd প্রভৃতি ধাতুর ক্ষেত্রে। পরিমাপের দ্বারা দেখা যায় যে Bi ($Z = 83$) এর ক্ষেত্রে হল্-গুণাংক অস্বাভাবিক রকম উচ্চ হয়। অন্যান্য ধাতুর ক্ষেত্রে হল্-গুণাংকের মান এর শতাংশ মাত্রিক হয়।

বর্তমানে হল্ ক্রিয়া সম্পর্কিত পরীক্ষার সাহায্যে নানারূপ পদার্থের, বিশেষতঃ অর্ধপরিবাহী পদার্থসমূহের বাহকের সংখ্যা ঘনত্ব এবং বাহকের স্বরূপ ( অর্থাৎ তারা ইলেকট্রন অথবা গহ্বর ) ইত্যাদি নানারূপ তথ্য জানা যায়।

## সম্পাদ্য §

1. $10^{-8}$ অ্যামপিয়ার/সেমি$^2$ ক্যাথোড রশ্মিপ্রবাহ একটি অভ্রফলকের উপরে লম্বভাবে আপতিত হয়ে শোষিত হয়। যদি ক্যাথোড রশ্মিগুচ্ছের বেগ হয় $5 \times 10^9$ সেমি/সেকেণ্ড, তাহলে ফলকের উপর প্রযুক্ত চাপ নির্ণয় কর। ($2{\cdot}84 \times 10^{-7}$ ডাইন/সেমি$^2$)

2. $v$ বেগ সম্পন্ন একগুচ্ছ ইলেকট্রন $l$ দৈর্ঘ্যের দুটি ধাতব প্লেটের মধ্যে প্রযুক্ত $X$ তড়িৎক্ষেত্রের মধ্যে লম্বভাবে প্রবেশ করে। ইলেকট্রনগুলির আদি গতিপথ প্লেট দুটির দৈর্ঘ্যের সমান্তরাল হলে প্রমাণ কর যে তড়িৎক্ষেত্রে এদের বিচ্যুতি হয় $y_1 = \frac{Xe}{2m_0}\left(\frac{l}{v}\right)^2$। প্লেট দুটির প্রান্তে তড়িৎ-ক্ষেত্রের বহির্বিস্তৃতি উপেক্ষণীয়।

3. (2) সম্পাদ্যে তড়িৎক্ষেত্র থেকে নির্গত ইলেকট্রনগুলির গতিপথ ও তাদের আদি গতিপথের অন্তর্গত কোণ $\theta$ হলে প্রমাণ কর যে $\tan\,\theta = 2y_1/l$।

প্রমাণ কর যে তড়িৎক্ষেত্রের নির্গমন প্রান্ত থেকে $L$ দূরত্বে ইলেকট্রনগুচ্ছের অতিরিক্ত বিচ্যুতি হয় $y_2 = \frac{Xe}{m_0}\,\frac{lL}{v^2}$। ইলেকট্রনগুচ্ছের মোট বিচ্যুতি থেকে এদের $\frac{e}{m_0}$ নির্ণয় কর।

4. হাইড্রোজেনের পরমাণবিক ভর যদি এক একক হয় তাহলে একটি হাইড্রোজেন পরমাণুর ভর কত গ্রাম হবে? মনে কর অ্যাভোগেড্রো সংখ্যা $N = 6{\cdot}025 \times 10^{23}$।

5. এক তৈলবিন্দু পরীক্ষায় বিভিন্ন তৈলবিন্দুর $10^{-10}$ esu এককে পরিমিত নিম্নলিখিত আধানগুলি পাওয়া যায়ঃ 24·1, 33·6, 43·47, 19·08, 53·13, 29·16, 38·4, 9·48, 19·2 এবং 14·31; প্রদত্ত রাশিমালা থেকে ইলেকট্রনের আধান নির্ণয় কর।

6. $r = 0{\cdot}1$, $10^{-3}$ ও $10^{-5}$ মিমি ব্যাসার্ধের তৈলবিন্দুর ক্ষেত্রে বাতাসে ষ্টোক্‌সের সান্দ্রতা-জনিত বাধার সূত্রের শতকরা সংশোধন নির্ণয় কর। ধর যে (2·17) সমীকরণে $b = 6{\cdot}17 \times 10^{-6}$ এবং $p = 76$ সেমি Hg।

7. একটি আহিত তৈলবিন্দু বিনা তড়িৎক্ষেত্রে বাতাসে 0·2 মিমি/সেকেণ্ড সমবেগে নীচের দিকে পড়তে থাকে। (2·11) ও (2·12) সমীকরণের সাহায্যে এর ব্যাসার্ধ ও ভর নির্ণয় কর। রাশিমালাঃ $\rho = 0{\cdot}8$ গ্রাম/ঘন সেমি; $\sigma = 1{\cdot}13 \times 10^{-3}$ গ্রাম/ঘন সেমি; $\eta = 1{\cdot}81 \times 10^{-4}$ cgs একক; $e = 9{\cdot}6 \times 10^{-10}$ esu। ($4{\cdot}51 \times 10^{-3}$ সেমি; $3{\cdot}08 \times 10^{-7}$ গ্রাম)

এখন যদি বিন্দুটির উপর একটি উল্লম্ব তড়িৎক্ষেত্র $X$ প্রয়োগ করা হয়, তাহলে $X$ এর কত মানে বিন্দুটি গতিহীন হয়ে যাবে?

8. মিলিকানের তৈলবিন্দু পরীক্ষায় অণুবীক্ষণের সাপেক্ষে তৈলবিন্দুগুলিকে আলোকিত করার বাতি এবং X-রশ্মি উৎস কোথায় স্থাপিত করা উচিত তা যুক্তি সহকারে বুঝাও।

9. প্রাকৃতিক অক্‌সিজেনের তিনটি আইসোটোপের ভরসংখ্যা ও এদের আপেক্ষিক প্রাচুর্য হচ্ছে যথাক্রমে 16 (99·76%), 17 (0·04%) এবং 18 (0·20%)। যদি আইসোটোপগুলির পরমাণবিক ভর এদের ভরসংখ্যার সমান ধরা যায়, তাহলে ভৌত স্কেলে অক্‌সিজেনের রাসায়নিক পরমাণবিক ভার এবং পরমাণবিক ভারের রাসায়নিক ও ভৌত এককের অনুপাত নির্ণয় কর।

---

§ A-3 ও A-5 পরিশিষ্টে প্রদত্ত রাশিমালা ব্যবহার কর।

10. $C^{12}$ স্কেলে $H^1$, $n^1$, $He^4$ ও $O^{16}$ এর পরমাণবিক ভর নির্ণয় কর। $O^{16}$ স্কেলে $M(C^{12}) = 12.003842$ amu।

* * *

11. হাইড্রোজেন পরমাণুর প্রথম বোর কক্ষপথের ব্যাসার্ধ ও এই কক্ষপথে ইলেকট্রনের বেগ নির্ণয় কর। ( $5.29 \times 10^{-9}$ সেমি, $2.2 \times 10^8$ সেমি/সে )

12. হাইড্রোজেন পরমাণুর প্রথম, দ্বিতীয় ও তৃতীয় কক্ষপথে ইলেকট্রনের শক্তি ই-ভো এককে নির্ণয় কর। এদের মধ্যে সংক্রমণের ফলে উৎপন্ন বিভিন্ন বর্ণালীরেখার তরঙ্গদৈর্ঘ্য নির্ণয় কর।

13. অসীম ভর সম্পন্ন পরমাণুর ক্ষেত্রে রিডবার্গ ধ্রুবকের মান নির্ণয় কর।

14. হাইড্রোজেন ও একক আয়নিত হিলিয়ামের রিডবার্গ ধ্রুবকের মান হয় যথাক্রমে 109677.58 ও 109722.27 সেমি$^{-1}$। যদি হিলিয়াম ও হাইড্রোজেন কেন্দ্রকের ভরের অনুপাত 3.9726 হয়, তাহলে প্রোটন ও ইলেকট্রনের ভরের অনুপাত কত হয়? (1836)

15. হাইড্রোজেনের 1, 2, 3 ভরসংখ্যা সম্পন্ন তিনটি আইসোটোপ আছে। যদি দ্বিতীয় ও তৃতীয় আইসোটোপের কেন্দ্রকের ভর যথাক্রমে প্রথমটির দ্বিগুণ ও তিনগুণ ধরা হয়, তাহলে প্রথমটির সাপেক্ষে এদের $H_a$ রেখাগুলির তরঙ্গদৈর্ঘ্য ব্যবধান নির্ণয় কর।

16. হাইড্রোজেনের প্রথম বোর কক্ষপথে আবর্তনশীল ইলেকট্রন ও এর কেন্দ্রকের প্রোটনের মধ্যে মহাকর্ষ বল নির্ণয় কর। এই বল এবং এদের মধ্যেকার কুলম্ব আকর্ষণী বলের অনুপাত নির্ণয় কর।

17. হাইড্রোজেনের বামার শ্রেণীর প্রথম বর্ণালীরেখার তরঙ্গদৈর্ঘ্য হচ্ছে 6562.8 অ্যাং। যদি ডয়টেরিয়ামের অনুরূপ রেখার তরঙ্গদৈর্ঘ্য এর থেকে 1.79 অ্যাং কম হয়, তাহলে দুটি আইসোটোপের পরমাণু কেন্দ্রকের ভরের তুলনা কর।

18. সমারফেল্ডের আপেক্ষিকতাবাদ জনিত শুদ্ধিপদ প্রয়োগ করে হাইড্রোজেনের ক্ষেত্রে $n = 2$ শক্তিস্তরের বিভিন্ন $k$ সম্পন্ন উপশক্তিস্তর দুটির শক্তি-ব্যবধান এবং বোর শক্তির অনুপাত নির্ণয় কর।

19. একটি ভৌমস্তরে অবস্থিত হাইড্রোজেন পরমাণুর উপর (a) 11.8 ই-ভো, (b) 5.5 ই-ভো গতিশক্তি সম্পন্ন ইলেকট্রন আপতিত হয়ে বিক্রিয়া করার পরে ইলেকট্রনটির ন্যূনতম কত গতিশক্তি অবশিষ্ট থাকে? ( 1.6, 5.5 ই-ভো )

20. ভৌমস্তরে অবস্থিত হাইড্রোজেন পরমাণুর উপর ইলেকট্রন বর্ষণের ফলে বামার শ্রেণীভুক্ত প্রথম বর্ণালীরেখা উৎপন্ন হয়। ইলেকট্রনগুচ্ছের ন্যূনতম প্রাথমিক শক্তি কত হওয়া প্রয়োজন? এক্ষেত্রে আর কোন বর্ণালীরেখা উৎপন্ন হতে পারে? ( 12.09 ই-ভো )

* * *

21. একটি 1.99 ই-ভো নিষ্পাদনীয় কার্য সম্পন্ন সিজিয়াম ফোটো-ক্যাথোড থেকে ইলেকট্রন নিঃসরণের জন্য সর্বাধিক কত তরঙ্গদৈর্ঘ্য সম্পন্ন আলোকের প্রয়োজন? যদি ব্যবহৃত আলোকের তরঙ্গদৈর্ঘ্য 4102 অ্যাং হয়, তাহলে নিঃসৃত ফোটো-ইলেকট্রনের গতিশক্তি ও বেগ কত হয়?

22. হাইড্রোজেনের লাইম্যান, বামার ও পাশেন শ্রেণীভুক্ত প্রথম, দ্বিতীয় ও তৃতীয় বর্ণালীরেখা উৎপাদক ফোটনগুলির শক্তি নির্ণয় কর।

23. 2·1 ই-ভো নিষ্পাদনীয় কার্য সম্পন্ন রুবিডিয়াম ফোটো-ক্যাথোডের উপর যথাক্রমে 3650, 4340 ও 4860 অ্যাং তরঙ্গদৈর্ঘ্যের আলোকপাত করা হয়। প্রতিক্ষেত্রে নিরোধ-বিভব নির্ণয় কর। ( 1 3, 0 76, 0 45 ই-ভো )

24. (4·8) অনুচ্ছেদে বর্ণিত পরীক্ষায় যদি ধাতব চোঙের ব্যাস হয় 1·6 সেমি এবং $V=500$ ভোল্ট হয়, তাহলে ন্যূনতম কত চৌম্বক ক্ষেত্র প্রয়োগ করলে ইলেকট্রন প্রবাহ বন্ধ হয়ে যাবে ?

25. যদি $W < W_f$ এবং $T=0°$ কেল্ হয়, তাহলে (4·6) সমীকরণের সাহায্যে প্রমাণ কর যে $W_f=\frac{h^2}{2m}\left(\frac{3n}{8\pi}\right)^{2/3}$ ; এখানে $n$ হচ্ছে ইলেকট্রন-সংখ্যা ঘনত্ব।

সোডিয়াম ধাতুর ( $A=23$, $\rho=0·971$ গ্রাম/ঘন সেমি ) ক্ষেত্রে প্রত্যেকটি পরমাণুর একটি করে পরিবাহী ইলেকট্রন আছে ধরে নিয়ে উপরের ফলাফল থেকে $W_f$ নির্ণয় কর। ( 3·1 ই-ভো )

26. একটি ধাতব তন্তুর উষ্ণতা 1800° কেল্ থেকে 1200° কেল্ পর্যন্ত কমাবার ফলে তাপায়ন নিঃসরণ প্রবাহ 1000 ভাগ কমে যায়। রিচার্ডসন-ডুশম্যান সমীকরণের সাহায্যে ধাতুটির তাপায়ন নিষ্পাদনীয় কার্য নির্ণয় কর।

27. একটি আলোক-তাড়িত নিঃসারক তল পরপর 3845, 4210, 4640, 5180 এবং 5615 অ্যাং তরঙ্গদৈর্ঘ্য সম্পন্ন আলোক দ্বারা উদ্ভাসিত করার ফলে যথাক্রমে নিম্নলিখিত নিরোধ-বিভবগুলি ($V_0$) পাওয়া যায় ; 1·315, 1·04, 0 775, 0 49 এবং 0 30 ভোল্ট। $V_0$ এবং আলোকের কম্পাংকের লেখচিত্র থেকে নিঃসারক ধাতুর সূচনা তরঙ্গদৈর্ঘ্য এবং প্ল্যাংক ধ্রুবক নির্ণয় কর।

* * *

28. কক্ষীয় কোয়ানটাম সংখ্যা $k=1, 2, 3$ হলে প্রযুক্ত চৌম্বক ক্ষেত্র এবং কক্ষীয় কৌণিক ভরবেগের অন্তর্গত সম্ভাব্য কোণগুলির মান নির্ণয় কর।

29. বোর ম্যাগনেটনের মান নির্ণয় কর।

30. চৌম্বক ক্ষেত্র $H=5000$ গাওস হলে লার্মর অয়নচলন কম্পাংকের মান নির্ণয় কর। এর থেকে স্বাভাবিক জীমান বিভাজন জনিত তরঙ্গদৈর্ঘ্য ব্যবধান নির্ণয় কর।

একটি বর্ণালীরেখার তরঙ্গদৈর্ঘ্য 5893 অ্যাং হলে উপরের তরঙ্গদৈর্ঘ্য ব্যবধান এর শতকরা কত ভাগ হয় ?

31. আধুনিক কোয়ানটাম তত্ত্ব অনুযায়ী প্রাপ্ত $\mathbf{p}_l$ ভেক্টর এবং প্রযুক্ত চৌম্বক ক্ষেত্রের অন্তর্গত কোণগুলির মান $l=1, 2$ এবং 3 হলে কত হয় ? বিভিন্ন $l$ এর জন্য চৌম্বক ক্ষেত্র অভিমুখে $\mathbf{p}_l$ ভেক্টরের সর্বোচ্চ উপাংশ এবং উক্ত ভেক্টরের মানের অনুপাত নির্ণয় কর। ( ইংগিত : 144 পৃষ্ঠায় প্রদত্ত আলোচনা দেখ )

32. একটি বহু-ইলেকট্রন পরমাণুর কক্ষীয়, ঘূর্ণন ও মোট কোয়ানটাম সংখ্যাগুলিকে $L$, $S$, ও $J$ দ্বারা নির্দেশ করা হয়। যদি $L=2$, $S=1$ এবং $J=2$ হয়, তাহলে পুরাতন কোয়ানটাম তত্ত্ব অনুযায়ী প্রয়োজনীয় ভেক্টর চিত্রের সাহায্যে **L** এবং **S** এর অন্তর্গত কোণের মান নির্ণয় কর।

33. স্থান কোয়ানটায়ন সূত্র প্রয়োগ করে **L** ও **S** ভেক্টরের বিভিন্ন নিম্নে প্রদত্ত মান সমন্বয়ের জন্য ভেক্টর চিত্র অংকন করে পুরাতন কোয়ানটাম তত্ত্ব অনুযায়ী $J$ নির্ণয় কর : $L=1, S=1$ ; $L=2, S=1$ ; $L=1, S=\frac{1}{2}$ ; $L=2, S=\frac{3}{2}$ ।

34. একটি X-রশ্মি আধারের অ্যানোড ও ক্যাথোডের মধ্যে 20,000 ভোল্ট বিভব প্রভেদ প্রয়োগ করা হলে নিঃসৃত X-রশ্মির ন্যূনতম তরঙ্গদৈর্ঘ্য কত হয়? (0·6206 অ্যাং)

35. তামার ($Z=29$) K এবং $L_{II}$ শোষণ সীমার তরঙ্গদৈর্ঘ্য হচ্ছে যথাক্রমে 1·3774 অ্যাং এবং 12·9 অ্যাং। তামার $K_{\alpha_2}$ রেখার তরঙ্গদৈর্ঘ্য কত?

36. একটি X-রশ্মির আধারে মলিবডেনাম ($Z=42$) লক্ষ্যবস্তুর সংগে কিছু অপদ্রব্য মিশ্রিত আছে। আধার থেকে নিঃসৃত X-রশ্মির মধ্যে 1·43603 অ্যাং তরঙ্গদৈর্ঘ্যের মলিবডেনাম $K_{\alpha_2}$ রেখা ছাড়া 0·53832 অ্যাং তরঙ্গদৈর্ঘ্যের আর একটি রেখা পাওয়া যায়। মোজ্‌লে সূত্র থেকে অপদ্রব্যের পরমাণবিক সংখ্যা নির্ণয় কর।

37. একটি X-রশ্মি আধারের অ্যানোড ও ক্যাথোডের মধ্যে 60 কিলোভোল্ট বিভব প্রভেদ প্রয়োগ করা হয়। আধার থেকে নিঃসৃত X-রশ্মি যথাক্রমে কোবাল্ট, মলিবডেনাম ও প্যালাডিয়ামের K খোলস থেকে ফোটো-ইলেকট্রন নিঃসৃত করে। যদি এই ধাতুগুলির K শোষণ-সীমার তরঙ্গদৈর্ঘ্য হয় যথাক্রমে 1·6040 অ্যাং, 0·61848 অ্যাং এবং 0·50795 অ্যাং, তাহলে প্রতিক্ষেত্রে নিঃসৃত ফোটো-ইলেকট্রনের উচ্চতম গতিশক্তি কত হয়?

38. (6·20) সমীকরণের সাহায্যে সনাতন ইলেকট্রন ব্যাসার্ধ নির্ণয় কর।

39. পরীক্ষার দ্বারা 0·880, 1·00, 1·235 এবং 1·389 অ্যাং তরঙ্গদৈর্ঘ্যে নিকেলের ভর শোষণ গুণাংক পাওয়া যায় যথাক্রমে 81·3, 118·5, 208 এবং 286; প্রতিক্ষেত্রে নিকেলের অর্ধমান বেধ নির্ণয় কর। তরঙ্গদৈর্ঘ্যের সংগে ভরশোষণ গুণাংক পরিবর্তনের লেখচিত্র আঁক এবং তার থেকে এই পরিবর্তনের গাণিতিক সূত্র (আসন্ন) নির্ণয় কর। (নিকেলের ঘনত্ব = 8·60 গ্রাম/সেমি$^3$)।

40. (6·26) সমীকরণের সাহায্যে কম্পটন তরঙ্গদৈর্ঘ্যের মান নির্ণয় কর।

41. প্রমাণ কর যে $\phi$ কোণে কম্পটন বিক্ষেপের সময়ে প্রতিক্ষিপ্ত ইলেকট্রনের গতিশক্তি হয় $E_k=h\nu/\{1+m_0c^2/h\nu(1-\cos\phi)\}$। এর থেকে প্রতিক্ষিপ্ত ইলেকট্রনের সর্বোচ্চ গতিশক্তি নির্ণয় কর।

42. ঘনকাকৃতি KBr কেলাসের ঘনত্ব 2·75 গ্রাম/সেমি$^3$ এবং এর আণবিক ভার 119·01; এই কেলাসের ঝাঁঝরি ব্যবধান নির্ণয় কর। যদি প্যালাডিয়াম $K_{\alpha_2}$ X-রশ্মি ($\lambda=0·58863$ অ্যাং) এই কেলাস থেকে ব্যবর্তিত করা হয়, তাহলে প্রথম ক্রমের ব্যবর্তন তির্যক কোণ কত হবে? (3·273 অ্যাং, 5°9)

43 (6·24) সমীকরণের সাহায্যে 0·7 অ্যাং তরঙ্গদৈর্ঘ্যের X-রশ্মির ক্ষেত্রে ক্যালসাইট কেলাসের প্রতিসরণ গুণাংক নির্ণয় কর। (ক্যালসাইটের আণবিক ভার 100·09 এবং ঘনত্ব 2·93 গ্রাম/সেমি$^3$)।

* * *

44. 50, 200, 5000, $4\times10^4$ এবং $3\times10^6$ ই-ভো গতিশক্তি সম্পন্ন ইলেকট্রন ও প্রোটনগুচ্ছের দ্য ব্রয় তরঙ্গদৈর্ঘ্য নির্ণয় কর।

45. 27° সে উষ্ণতায় তাপীয় নিউট্রনগুচ্ছের দ্য ব্রয় তরঙ্গদৈর্ঘ্য নির্ণয় কর। যদি এই নিউট্রন-গুচ্ছ ঘনকাকৃতি KCl কেলাস দ্বারা ব্যবর্তিত করে প্রথম ক্রমের তির্যক ব্যবর্তন কোণ পাওয়া যায় 16°45′, তাহলে কেলাসের ঝাঁঝারি ব্যবধান কত হয় ?

46. ডেভিসন ও গার্মারের পরীক্ষায় নিকেল কেলাস থেকে 83 ই-ভো ইলেকট্রনগুচ্ছ ব্যবর্তন করে 55° তির্যক কোণে ব্যবর্তন চূড়া পাওয়া যায়। (6·37) সংশোধিত ব্র্যাগ সমীকরণের সাহায্যে নিকেলের প্রতিসরণ গুণাংক নির্ণয় কর। $n=3$ এবং $D=2{\cdot}03$ অ্যাং ধর। $n=2$ ধরলে কী অসংগতি পাওয়া যায় ? $\mu$ এর নির্ণীত মান থেকে (7·10) সমীকরণের সাহায্যে $\Delta V$ নির্ণয় কর।

47. প্রমাণ কর যে সনাতন বলবিদ্যা শাসিত নিম্নশক্তি ইলেকট্রনের ক্ষেত্রে ইলেকট্রন তরঙ্গের গুচ্ছবেগ ইলেকট্রনের বেগের সমান হয়।

48. কোন ইলেকট্রন অণুবীক্ষণে $10^4$ ভোল্ট বিভব দ্বারা ত্বরিত ইলেকট্রনগুচ্ছ ব্যবহার করা হয়। অণুবীক্ষণটির সর্বোচ্চ বিশ্লেষণ ক্ষমতা কত হতে পারে ? যদি কোন কাল্পনিক অণুবীক্ষণে অনুরূপ শক্তিসম্পন্ন X-রশ্মি ব্যবহার করা যায়, তাহলে বিশ্লেষণ ক্ষমতা কত হবে ?

49. একটি ইলেকট্রনের গতিশক্তি 1 মি-ই-ভো হলে হাইসেনবার্গের অনিশ্চয়তাবাদ অনুযায়ী এর অবস্থানের অনিশ্চয়তা কত হবে ? এই শক্তির ইলেকট্রন কি কোন পরমাণু কেন্দ্রকের মধ্যে থাকতে পারে ? কেন্দ্রকের ব্যাস $10^{-12}$ সেমি ধরা যেতে পারে। কত শক্তির ইলেকট্রন এই কেন্দ্রকের ভিতরে থাকতে পারে ?

50. একটি পরমাণবিক ইলেকট্রন $10^{-8}$ সেকেণ্ড সময় ধরে উত্তেজিত শক্তিস্তরে থাকে। পরমাণবিক শক্তিস্তরের শক্তি বিস্তার (অর্থাৎ শক্তির অনিশ্চয়তা) কত ? ভৌমস্তরের শক্তি বিস্তার কত ? ( $4{\cdot}14\times10^{-7}$ ই-ভো ; 0 )

51. একটি পরমাণু কেন্দ্রক $10^{-13}$ সেকেণ্ড ধরে উত্তেজিত স্তরে থাকে। কেন্দ্রকীয় শক্তিস্তরের শক্তি বিস্তার কত ? ( $4{\cdot}14\times10^{-3}$ ই-ভো )

* * *

52. কোন বস্তুর বেগ শতকরা একভাগ ( 1% ) বাড়লে বস্তুটির ভরবেগের শতকরা বৃদ্ধি কত হয়, যদি (ক) $\frac{v}{c}=0{\cdot}7$ এবং (খ) $\frac{v}{c}=0{\cdot}99$ হয় ?

53. প্রমাণ কর যে স্থির অবস্থায় স্থিত $m_0$ স্থির ভরের কোন বস্তুর উপর একটি সমদিষ্ট ধ্রুবক বল $F$ প্রযুক্ত হলে, $t$ সময় পরে বস্তুটির বেগ হবে $v=cFt/\sqrt{m_0^2c^2+F^2t^2}$।

প্রমাণ কর যে $t$ খুব কম হলে উপরের ফলাফল সনাতন বলবিদ্যা লব্ধ সিদ্ধান্ত থেকে অভিন্ন হয়। সুদীর্ঘ সময় পরে $v$ কত হয় ?

54. কোন বস্তুর মোট শক্তি শতকরা দশ ভাগ (10%) বৃদ্ধি পেলে এর বেগের শতকরা বৃদ্ধি কত হয়, যদি বস্তুটির মোট শক্তি এর স্থিরশক্তির (ক) 2 গুণ, (খ) 10 গুণ এবং (গ) 100 গুণ হয় ?

55. কোন কণিকার গতিশক্তি (8·27) সমীকরণের পরিবর্তে সনাতন বলবিদ্যা লব্ধ অভিব্যক্তি দ্বারা প্রকাশ করলে 1·5% ভুল হয়। কণিকাটির বেগ কত ? কণিকাটি ইলেকট্রন হলে এর গতিশক্তি কত ? প্রোটন হলেই বা কত ?

56. প্রমাণ কর যে অতি উচ্চশক্তি কণিকার ক্ষেত্রে মোট শক্তি এবং গতিশক্তি দুটিই প্রায় $pc$ সংখ্যাটির সমান হয়।

57. কোন কণিকার গতিশক্তি $E_k = pc$ লিখলে 2% ভুল হয়। এর বেগ কত? কণিকাটি ইলেকট্রন হলে এর গতিশক্তি কত? প্রোটন হলেই বা কত? ( 0·98$c$ ; 2·04 মি-ই-ভো; 3724 মি-ই-ভো )

58. একটি কণিকার ভরবেগ 0·70 মি-ই-ভো/$c$ হলে এর মোট শক্তি এবং বেগ কত হয়, যদি কণিকাটি (ক) ইলেকট্রন হয়, (খ) প্রোটন হয়?

# পরমাণু ও কেন্দ্রক গঠন পরিচয়

[ দ্বিতীয় খণ্ড ]

# পরিচ্ছেদ 11

# তেজস্ক্রিয়তা

## 11. 1 : তেজস্ক্রিয়তা ; সূচনা

রাদারফোর্ড আলফা-বিক্ষেপ পরীক্ষা থেকে সর্বপ্রথম পরমাণুর গঠন সম্পর্কে বর্তমানে প্রচলিত মতবাদ উদ্‌ভাবিত করেন, এ কথা তৃতীয় পরিচ্ছেদে সংক্ষেপে উল্লেখ করা হয়েছে। পরবর্তী পরিচ্ছেদে এ সম্বন্ধে আরও বিস্তৃত-ভাবে আলোচনা করা হবে। রাদারফোর্ডের এই মতবাদ অনুসারে পরমাণুর মধ্যে দুটি স্বতন্ত্র অংশ থাকে। একটি তার বহির্গঠন, অন্যটি তার কেন্দ্রক (Nucleus)। ইতিপূর্বে পরমাণুর বহির্গঠন, অর্থাৎ তার কক্ষপথে আবর্তনশীল ইলেকট্রনীয় গঠন সম্বন্ধে বিশদভাবে আলোচনা করা হয়েছে। তৃতীয় পরিচ্ছেদে উল্লেখ করা হয়েছিল যে রাদারফোর্ডের মতানুসারে পরমাণুর কেন্দ্রক-সমূহ আয়তনে অতি ক্ষুদ্র ; এদের ব্যাস পরমাণুর ব্যাসের দশ হাজার ভাগ অপেক্ষাও ক্ষুদ্রতর হয়। কিন্তু পরমাণুর ভরের অধিকাংশই এই অতি ক্ষুদ্র কেন্দ্রকের মধ্যে নিহিত থাকে। কেন্দ্রকের গঠন সম্বন্ধে আমাদের ধারণা মাত্র বিগত ত্রিশ চল্লিশ বৎসরে ক্রমশঃ সুস্পষ্ট হয়ে আসছে।

কেন্দ্রকের যে একটা নিজস্ব গঠন থাকতে পারে এ সম্বন্ধে সর্বপ্রথম কিছুটা আভাস পাওয়া যায় ইউরেনিয়াম, থোরিয়াম প্রভৃতি ভারী মৌলসমূহের তেজস্ক্রিয়তা সম্পর্কিত নানারূপ পরীক্ষা থেকে। X-রশ্মি আবিষ্কারের এক বছরের মধ্যে ১৮৯৬ সালে ফরাসী বিজ্ঞানী বেকেরেল (Henri Bequerel) পদার্থের তেজস্ক্রিয়তা (Radioactivity) ধর্ম আবিষ্কার করেন। এর অব্যবহিত পরে প্যারিসে বেকেরেল, পিয়ের কুরী (Pierre Curie) এবং মাদাম কুরী (Madam Curie) বিভিন্ন সূক্ষ্ম পরীক্ষার দ্বারা তেজস্ক্রিয়তা সম্পর্কিত নানারূপ গুরুত্বপূর্ণ তথ্য উদ্‌ঘাটিত করেন। তাঁদের এই সব প্রাথমিক গবেষণা এবং তার অল্প কিছুদিনের মধ্যে ইংলণ্ডে লর্ড রাদারফোর্ড কর্তৃক অনুষ্ঠিত তেজস্ক্রিয় পদার্থসমূহ থেকে নিঃসৃত বিভিন্ন প্রকার রশ্মি সংক্রান্ত নানাবিধ পরীক্ষা পরবর্তী যুগে পরমাণু কেন্দ্রকের গঠন সম্বন্ধীয় রহস্য উদ্‌ঘাটনের পথে প্রথম সোপান বলে মনে করা যেতে পারে।

## 11. 2 : তেজস্ক্রিয়তার আবিষ্কার

X-রশ্মির মত তেজস্ক্রিয়তাও সম্পূর্ণ অপ্রত্যাশিতভাবে আবিষ্কৃত হয়। ষষ্ঠ পরিচ্ছেদে দেখা গেছে যে রন্‌ট্‌গেন X-রশ্মির যে সকল ধর্ম আবিষ্কার করেন তাদের মধ্যে অন্যতম ছিল কাঁচ প্রভৃতি বিভিন্ন পদার্থে X-রশ্মির প্রতিপ্রভা (Fluorescence) উৎপাদন ক্ষমতা। X-রশ্মি উৎপাদনের সময় X-রশ্মি আধারের কাঁচ নির্মিত গাত্রে যে প্রতিপ্রভার সৃষ্টি হয়, তার সঙ্গে সাধারণ আলোক দ্বারা উদ্ভাসিত ইউরেনিয়াম প্রভৃতি মৌলের কোন কোন লবণের মধ্যে উৎপন্ন অনুপ্রভার (Phosphorescence) কোন সম্পর্ক আছে কী না এ সম্বন্ধে বেকেরেল কতকগুলি পরীক্ষা অনুষ্ঠিত করার সংকল্প করেন। এই উদ্দেশ্যে তিনি ইউরেনিয়াম সালফেট লবণের একটি টুকরা কৃষ্ণবর্ণ কাগজের দ্বারা সম্পূর্ণ আবৃত একটি ফোটোগ্রাফিক প্লেটের উপর স্থাপিত করে লবণের টুকরাটিকে সূর্যালোকের দ্বারা উদ্ভাসিত করেন। তাঁর উদ্দেশ্য ছিল যে সূর্যালোকের প্রভাবে লবণটি অনুপ্রভা ক্ষমতা লাভ করে যে অনুপ্রভ বিকিরণ নিঃসৃত করবে তা কৃষ্ণবর্ণ কাগজ ভেদ করে ফোটোগ্রাফিক প্লেটের উপর বিক্রিয়া করে কী না তা দেখা। প্লেটটি বিকসিত করার পর তিনি দেখেন যে লবণের টুকরাটি প্লেটের উপর যে জায়গায় স্থাপিত ছিল ঠিক সেই স্থানে টুকরাটির আকৃতি সম্পন্ন একটি কৃষ্ণবর্ণ দাগ প্লেটের উপর সৃষ্ট হয়েছে। এর থেকে তিনি সিদ্ধান্ত করেন যে ইউরেনিয়াম সালফেট লবণটি সত্যই এক প্রকার বিকিরণ নিঃসৃত করে। অবশ্য তখন তাঁর ধারণা ছিল যে এই বিকিরণের উৎপত্তি হয় লবণটির অনুপ্রভার জন্য।

এর পর তিনি ইউরেনিয়াম লবণ থেকে নিঃসৃত উপরোক্ত বিকিরণের ভেদ্যতা প্রভৃতি ধর্ম সম্বন্ধে নানারূপ পরীক্ষা করতে থাকেন। এই সময় এক মেঘলা দিনে তিনি লবণটিকে সূর্যালোকে উদ্‌ভাসিত করতে অসমর্থ হয়ে লবণ শুদ্ধ ফোটোগ্রাফিক প্লেটটিকে টেবিলের দেরাজের মধ্যে রেখে দেন। কয়েকদিন পরে তিনি ফোটোগ্রাফিক প্লেটটিকে বিকসিত করে দেখেন ঠিক আগের মতই লবণের টুকরার আকৃতি সম্পন্ন একটি কৃষ্ণবর্ণ দাগ প্লেটের উপর সৃষ্ট হয়েছে। অর্থাৎ সূর্যালোকের দ্বারা উদ্ভাসিত না করা সত্ত্বেও ইউরেনিয়াম লবণের টুকরাটি এক প্রকার অদৃশ্য বিকিরণ নিঃসৃত করে, যা কৃষ্ণবর্ণ কাগজ ভেদ করে ফোটোগ্রাফিক প্লেটের উপর আপতিত হতে পারে।

এ সম্বন্ধে আরও নিশ্চিত হবার জন্য তিনি ফোটোগ্রাফিক প্লেটটিকে একটি আলোক-অপ্রবেশ্য (Light-tight) বাক্সের মধ্যে স্থাপিত করে উপরোক্ত

পরীক্ষার পুনরাবৃত্তি করেন এবং একই ফল পান। এর থেকে তিনি সিদ্ধান্ত করেন যে কোনরূপ আলোকের দ্বারা উদ্ভাসিত না করলেও ইউরেনিয়াম লবণ স্বতঃস্ফূর্ত ভাবে (Spontaneously) এক প্রকার বিকিরণ নিঃসৃত করে, যার উৎপত্তির সংগে অনুপ্রভার কোন সম্পর্ক নাই।

ইউরেনিয়ামের বিভিন্ন প্রকার লবণ নিয়ে পরীক্ষা করেও বেকেরেল উপরোক্ত বিকিরণ নিঃসরণের নিদর্শন পান। পরে তিনি চূর্ণীকৃত ধাতব ইউরেনিয়াম থেকেও উপরোক্ত বিকিরণ নিঃসৃত হতে দেখেন। এই সমস্ত পরীক্ষা থেকে তিনি সিদ্ধান্ত করেন যে উপরোক্ত বিকিরণ ইউরেনিয়াম মৌল থেকে নিঃসৃত হয়। নানারূপ পরীক্ষার দ্বারা প্রতীয়মান হয় যে নিঃসৃত বিকিরণের প্রকৃতি এবং তীব্রতা ইউরেনিয়ামের রাসায়নিক বা ভৌত পরিবর্তনের দ্বারা প্রভাবিত হয় না। অর্থাৎ বহির্প্রযুক্ত চাপ, উষ্ণতা বা রাসায়নিক গঠন পরিবর্তন করলেও ইউরেনিয়ামের তেজস্ক্রিয়তা সম্পূর্ণ অপরিবর্তিত থাকে। যেহেতু তেজস্ক্রিয়তা রাসায়নিক পরিবর্তনের দ্বারা প্রভাবিত হয় না, স্পষ্টতঃ পদার্থের এই ধর্মের সংগে পরমাণুর কক্ষপথে আবর্তনশীল ইলেকট্রনগুলির কোন সম্পর্ক থাকতে পারে না। কারণ একথা সুবিদিত যে পদার্থের রাসায়নিক ধর্মাবলী পরমাণুর বহিস্থ কক্ষপথে আবর্তনশীল সংযোজী ইলেকট্রনগুলি দ্বারা নির্ধারিত হয়। বস্তুতঃ বর্তমানে প্রচলিত মতবাদ অনুযায়ী পদার্থের তেজস্ক্রিয়তার উৎপত্তির কারণ নিহিত থাকে মৌলের পরমাণু-কেন্দ্রকের মধ্যে।

পরীক্ষার দ্বারা দেখা যায় যে নিঃসৃত বিকিরণ শুধু যে ফোটোগ্রাফিক প্লেটের উপর বিক্রিয়া করে তাই নয়, X-রশ্মির মত এই বিকিরণের গ্যাসকে আয়নিত করবার ক্ষমতাও আছে। পরবর্তী যুগে রাদারফোর্ড (Rutherford) বিভিন্ন পরীক্ষা দ্বারা প্রমাণিত করেন যে ইউরেনিয়াম থেকে দুই প্রকার বিকিরণ নিঃসৃত হয়। এদের মধ্যে এক প্রকার বিকিরণ খুব সহজেই শোষিত হয়ে যায়। রাদারফোর্ড এর নাম দেন আলফা-রশ্মি ($\alpha$-rays)। দ্বিতীয় প্রকার বিকিরণের ভেদ্যতা অপেক্ষাকৃত অনেক বেশী। তিনি এদের নাম দেন বীটা-রশ্মি ($\beta$-rays)। পরে তেজস্ক্রিয় পদার্থসমূহ থেকে আরও এক প্রকার অনেক বেশী ভেদ্যতা সম্পন্ন বিকিরণ নিঃসরণের নিদর্শন পাওয়া যায়। এই তৃতীয় প্রকার বিকিরণকে বলা হয় গামা-রশ্মি ($\gamma$-rays)।

পরবর্তী যুগে ইউরেনিয়াম ছাড়া থোরিয়াম, রেডিয়াম প্রভৃতি আরও কয়েকটি প্রকৃতিলব্ধ মৌল থেকে স্বতঃস্ফূর্তভাবে বিকিরণ নিঃসরণের নিদর্শন

পাওয়া গেছে। এইসব বিভিন্ন মৌলের স্বতঃস্ফূর্তভাবে বিকিরণ নিঃসরণ ক্ষমতাকে বলা হয় তাদের তেজস্ক্রিয়তা (Radioactivity) এবং এই জাতীয় মৌলগুলিকে বলা হয় তেজস্ক্রিয় মৌল (Radioactive Elements)। এখানে উল্লেখযোগ্য যে তেজস্ক্রিয়তা ধর্ম যে কেবল কয়েকটি প্রকৃতিলব্ধ মৌলের মধ্যেই লক্ষিত হয় তাই নয়, যে সব মৌল স্বভাবতঃ তেজস্ক্রিয় নয়, বর্তমান যুগে তাদেরও তেজস্ক্রিয় আইসোটোপ পরীক্ষাগারে সৃষ্টি করা সম্ভব হয়েছে। এই জাতীয় কৃত্রিম উপায়ে উৎপন্ন তেজস্ক্রিয় পদার্থ (Artificially Radioactive Substance) সম্বন্ধে (17·10) অনুচ্ছেদে আলোচনা করা হবে।

## 11. 3 : তেজস্ক্রিয় বিঘটন এবং অপসরণ সূত্র

(16·10) অনুচ্ছেদে আমরা দেখব যে সকল পরমাণুর কেন্দ্রক দুই প্রকার কণিকার দ্বারা গঠিত। এদের মধ্যে এক প্রকার কণিকা ইলেকট্রনের সমপরিমাণ ধনাত্মক আধানবাহী এবং তাদের ভর ইলেকট্রনের ভরের প্রায় 1836 গুণ বেশী। এদের বলা হয় প্রোটন (Proton)। সাধারণ হাইড্রোজেন পরমাণুর কেন্দ্রকে একটি মাত্র প্রোটন থাকে। প্রোটন ছাড়া পরমাণুর কেন্দ্রকে আর এক রকম কণিকা থাকে, যাদের নাম নিউট্রন। নিউট্রনের কোন আধান নাই। এদের ভর প্রোটনের ভর অপেক্ষা সামান্য বেশী হয়। কেন্দ্রকে বর্তমান প্রোটনের সংখ্যা পরমাণুর কক্ষপথে আবর্তনশীল ইলেকট্রনের সংখ্যার সমান হয়; অর্থাৎ প্রোটনের সংখ্যা মৌলের পরমাণবিক সংখ্যা (Atomic Number) $Z$-এর সমান হয়। আর কেন্দ্রকে অবস্থিত প্রোটন এবং নিউট্রনের মোট সংখ্যা $A$ হচ্ছে মৌলের ভর-সংখ্যা (Mass Number)। স্পষ্টতঃ যেসব পরমাণুর প্রোটন সংখ্যা সমান, তাদের রাসায়নিক ধর্ম সমরূপী হয়; অর্থাৎ তারা একই মৌলের পরমাণু। অপরপক্ষে প্রোটন সংখ্যা অপরিবর্তিত থাকলেও নিউট্রন সংখ্যা বিভিন্ন হওয়ার জন্য একই মৌলের পরমাণু বিভিন্ন ভর সম্পন্ন হতে পারে। এদের বলা হয় আইসোটোপ (2·9 অনুচ্ছেদ দ্রষ্টব্য)। যে কোন মৌল X এর আইসাটোপ সাধারণতঃ এর পরমাণবিক সংখ্যা $Z$ এবং ভর-সংখ্যা $A$ দ্বারা নির্দেশিত করা হয়, যথা $_{Z}X^{A}$।

রাদারফোর্ড নানারূপ পরীক্ষার দ্বারা প্রমাণিত করেন যে তেজস্ক্রিয় পদার্থ থেকে নিঃসৃত $\alpha$-কণিকাগুলি হচ্ছে হিলিয়াম মৌলের কেন্দ্রক। এদের মধ্যে দুটি প্রোটন এবং দুটি নিউট্রন থাকে; অর্থাৎ $\alpha$-কণিকাকে $_{2}He^{4}$ বা কেবল $He^{4}$ এই চিহ্ন দ্বারা নির্দেশিত করা যায়। স্পষ্টতঃ কোন তেজস্ক্রিয় মৌলের

পরমাণু কেন্দ্রক বিঘটিত (Disintegrate) হয়ে যদি একটি $\alpha$-কণিকা নিঃসৃত করে তাহলে উক্ত কেন্দ্রকের মধ্যে দুটি প্রোটন এবং দুটি নিউট্রন কমে যায়। সুতরাং বিঘটনের ফলে পরমাণুর প্রকৃতি পরিবর্তিত হয়ে যায় এবং রূপান্তরিত পরমাণুর পরমাণবিক সংখ্যা $(Z)$ আদি পরমাণুর তুলনায় দুই একক কমে যায় এবং এর ভর-সংখ্যা $(A)$ আদি পরমাণুর তুলনায় চার একক পরিমাণ কমে যায়। অর্থাৎ নবসৃষ্ট পরমাণুর পরমাণবিক সংখ্যা $(Z-2)$ হয় এবং ভর-সংখ্যা $(A-4)$ হয়।

আবার বিভিন্ন পরীক্ষা থেকে দেখা যায় যে তেজস্ক্রিয় পরমাণু নিঃসৃত $\beta$-কণিকাগুলি প্রকৃতপক্ষে খুব উচ্চ বেগ সম্পন্ন ইলেকট্রন। যেহেতু ইলেকট্রন-গুলি ঋণাত্মক আধান বহন করে, $\beta$-বিঘটনের ফলে পরমাণু কেন্দ্রকের ধনাত্মক আধান এক একক পরিমাণে বৃদ্ধি পায়; অর্থাৎ এর পরমাণবিক সংখ্যা $Z$ থেকে বৃদ্ধি পেয়ে $(Z+1)$ হয়। বস্তুতঃ আধুনিক তত্ত্ব অনুযায়ী এক্ষেত্রে কেন্দ্রক মধ্যস্থ একটি নিউট্রন রূপান্তরিত হয়ে একটি প্রোটনে পরিণত হয়। ফলে প্রোটন-নিউট্রন সংখ্যা ( ভর-সংখ্যা ) $A$ অপরিবর্তিত থাকে।

$\gamma$-রশ্মি এক প্রকার তড়িৎচুম্বকীয় তরঙ্গ। এদের তরঙ্গদৈর্ঘ্য অতি ক্ষুদ্র হয়; এমন কী অনেক ক্ষেত্রে X-রশ্মির তরঙ্গদৈর্ঘ্য অপেক্ষাও ক্ষুদ্রতর হয়। ফলে $\gamma$-রশ্মি ফোটনগুলি খুব শক্তিশালী হয়। সাধারণতঃ তেজস্ক্রিয় পদার্থের $\alpha$ বা $\beta$ বিঘটনের পর এক বা একাধিক $\gamma$-ফোটন নিঃসৃত হয়। $\gamma$-নিঃসরণের ফলে পরমাণুর প্রকৃতির কোন মৌলিক পরিবর্তন হয় না। কেবল কেন্দ্রকটি এক শক্তিস্তর থেকে অন্য স্তরে সংক্রমিত হয়।

$\alpha$ এবং $\beta$ বিঘটনের ফলে পরমাণুর প্রকৃতির যে মৌলিক পরিবর্তন ঘটে তা সর্বপ্রথম ১৯১৩ সালে সডী এবং ফাজান্‌স (Soddy and Fajans) নামক বিজ্ঞানীদ্বয় কর্তৃক প্রস্তাবিত অপসরণ সূত্র (Displacement Law) দ্বারা সুস্পষ্টভাবে নির্দেশ করা হয়। সডী এবং ফাজান্‌স সম্পূর্ণভাবে পরীক্ষা-লব্ধ তথ্যের ভিত্তিতে এই সূত্র প্রস্তাবিত করেন। এই সূত্র অনুসারে $\alpha$-বিঘটনের ফলে পরমাণুর ভর-সংখ্যা চার একক পরিমাণে কমে যায় এবং পর্যায় সারণীতে (Periodic Table) এর অবস্থান বাম দিকে দুই ধাপ অপসারিত হয়ে যায়; অপরপক্ষে $\beta$-বিঘটনের ফলে পরমাণুর ভর-সংখ্যা অপরিবর্তিত থাকে, কিন্তু পর্যায় সারণীতে এর অবস্থান ডান দিকে এক ধাপ অপসারিত হয়। পরবর্তী যুগে যখন কেন্দ্রকের গঠন সম্পর্কে বিজ্ঞানী মহলের ধারণা সুস্পষ্ট হয়ে

ওঠে, তখন সডী ও ফাজান্স কর্তৃক প্রস্তাবিত অপসরণ সূত্রের কারণ সহজেই বোধগম্য হয়। এ সম্বন্ধে উপরে আলোচনা করা হয়েছে।

## 11. 4: তেজস্ক্রিয়তার বৃদ্ধি এবং হ্রাস

ইউরেনিয়াম, থোরিয়াম প্রভৃতি মৌলের তেজস্ক্রিয়তা সময়ের সংগে বিশেষ পরিবর্তিত হতে লক্ষ্য করা যায় না। অপরপক্ষে কতকগুলি তেজস্ক্রিয় মৌল আছে (যথা রেডন গ্যাস) যাদের তেজস্ক্রিয়তা সময়ের সংগে হ্রাস পেতে থাকে। অর্থাৎ দ্বিতীয় শ্রেণীভুক্ত মৌলগুলি কর্তৃক নিঃসৃত তেজস্ক্রিয় বিকিরণের তীব্রতা সময়ের সংগে হ্রাস পায়। অবশেষে এই সব মৌলের বিকিরণ নিঃসরণ ক্ষমতা সম্পূর্ণ বিলুপ্ত হয়ে যায়।

১৯০০ খৃষ্টাব্দে বৃটিশ বিজ্ঞানী ক্রুক্স্ (William Crookes) লক্ষ্য করেন যে ইউরেনিয়াম লবণের মধ্যে এমন কোন বিশেষ দ্রব্য থাকে যা রাসায়নিক পদ্ধতিতে পৃথকীকৃত করলে ইউরেনিয়াম লবণটির তেজস্ক্রিয়তা সম্পূর্ণ বিলুপ্ত হয়ে যায়, এবং দেখা যায় যে সমগ্র তেজস্ক্রিয়তা পৃথকীকৃত দ্রব্যটির মধ্যে স্থানান্তরিত হয়ে গেছে। ক্রুক্স্ এই অজ্ঞাত দ্রব্যটির নাম দেন UX (ইউরেনিয়াম-X)। তিনি দেখান যে UXএর রাসায়নিক ধর্মাবলী ইউরেনিয়াম থেকে ভিন্ন।

এরপর ক্রুক্স্ নিষ্ক্রিয় ইউরেনিয়াম লবণটি এবং তেজস্ক্রিয় UX দ্রব্যটিকে কিছুদিন ফেলে রেখে দেন। কয়েক সপ্তাহ পরে তিনি দেখেন যে নিষ্ক্রিয় ইউরেনিয়ামের তেজস্ক্রিয়তা আবার পূর্বের অবস্থায় ফিরে এসেছে; অপরপক্ষে UX দ্রব্যটির তেজস্ক্রিয়তা সম্পূর্ণ বিলুপ্ত হয়েছে। ক্রুক্স্ দেখান যে সময়ের সংগে U এবং UX এর তেজস্ক্রিয়তার এই প্রকার বৃদ্ধি এবং হ্রাস দুটি গাণিতিক সূত্র দ্বারা প্রকাশ করা যায়। যদি তেজস্ক্রিয়তাকে (অর্থাৎ নিঃসৃত বিকিরণের তীব্রতাকে) $A$ চিহ্ন দ্বারা নির্দেশ করা যায়, তাহলে নিম্নলিখিত গাণিতিক সূত্র দুটি লেখা যায়ঃ

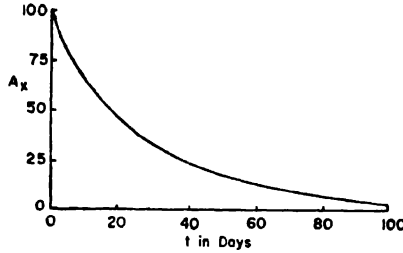
UX এর তেজস্ক্রিয়তা হ্রাসের সূত্রঃ

$$A_X = A_0 e^{-\lambda t} \tag{11.1}$$

U এর তেজস্ক্রিয়তা বৃদ্ধির সূত্রঃ

$$A_U = A_0(1 - e^{-\lambda t}) \tag{11.2}$$

এখানে $A_0$ এবং $\lambda$ দুটি ধ্রুবক; $t$ সংখ্যাটি U থেকে UX-কে পৃথকীকৃত করার পরে পরিমিত সময় নির্দেশ করে। স্পষ্টতঃ তেজস্ক্রিয়তার হ্রাস এবং বৃদ্ধি 'সূচক-সূত্র' (Exponential Law) অনুযায়ী ঘটে। $A_0$

হচ্ছে ইউরেনিয়াম থেকে পৃথক করার অব্যবহিত পরে UX এর তেজস্ক্রিয়তার মান। সমীকরণ (11·1) ও (11·2) অনুসারে দীর্ঘ সময় পরে ($t = \infty$)

চিত্র 11·1

সময়ের সংগে UXএর তেজস্ক্রিয়তা ($A_X$) হ্রাসের লেখচিত্র।

UX এর তেজস্ক্রিয়তা শূন্য হয়ে যায়, এবং U এর তেজস্ক্রিয়তা পূর্বমানে ফিরে আসে। সময়ের সংগে UX এবং U এর তেজস্ক্রিয়তার উপরোক্ত

চিত্র 11·2

সময়ের সংগে Uএর তেজস্ক্রিয়তা ($A_U$) বৃদ্ধির লেখচিত্র।

পরিবর্তনের লেখচিত্র (11·1) এবং (11·2) চিত্রে প্রদর্শিত হয়েছে এই পরিবর্তন নিম্নলিখিত ভাবে ব্যাখ্যা করা যায়।

তেজস্ক্রিয় বিকিরণ নিঃসরণ করে ইউরেনিয়াম মৌল UX নামক একটি নূতন মৌলে রূপান্তরিত হয়ে যায়। এই নূতন মৌলটিও তেজস্ক্রিয় বিকিরণ নিঃসরণ করে অন্য আর একটি মৌলে রূপান্তরিত হয়ে যায়। ক্রুক্স্ যখন ইউরেনিয়ামের তেজস্ক্রিয়তা নির্ণয় করেন, তখন তিনি প্রকৃতপক্ষে ইউরেনিয়ামের মধ্যে অল্প পরিমাণে বর্তমান UX মৌলের বিকিরণের তীব্রতা পরিমাপ করেন।

কারণ ইউরেনিয়াম থেকে নিঃসৃত বিকিরণ ( $\alpha$-রশ্মি ) খুব সহজেই শোষিত হয়ে যায় ; ফলে ক্রুকস্ তাঁর পরীক্ষায় এই বিকিরণের কোন নিদর্শন পান নি। যখন রাসায়নিক পদ্ধতিতে ইউরেনিয়াম থেকে UX-কে পৃথক করা হয়, তখন স্বভাবতঃই সমগ্র তেজস্ক্রিয়তা UX-এর মধ্যে পরিলক্ষিত হয় এবং ইউরেনিয়ামকে নিষ্ক্রিয় বলে বোধ হয়। পরে কিন্তু সময়ের সংগে নূতন করে ইউরেনিয়াম পরমাণুগুলির তেজস্ক্রিয় রূপান্তর ঘটার জন্য আবার কিছু পরিমাণ UX উৎপন্ন হয়, যার ফলে কয়েক সপ্তাহ পরে ইউরেনিয়ামের তেজস্ক্রিয়তা আবার ফিরে আসতে দেখা যায়। অপরপক্ষে পৃথকীকৃত UX থেকে ক্রমাগত তেজস্ক্রিয় বিকিরণ ( $\beta$-বিকিরণ ) নিঃসৃত হওয়ার দরুণ এর পরমাণুগুলি রূপান্তরিত হতে থাকে এবং এদের সংখ্যা ক্রমশঃ কমতে থাকে। ফলে UX থেকে নিঃসৃত তেজস্ক্রিয় বিকিরণের তীব্রতা সময়ের সংগে হ্রাস পায়।

ক্রুকস্‌ের পরীক্ষা থেকে আরও প্রমাণিত হয় যে কোন মৌলের তেজস্ক্রিয়তা মৌলটির পরিমাণের উপর নির্ভর করে। (11·2) অনুচ্ছেদে আমরা দেখেছি যে তেজস্ক্রিয়তা প্রকৃতপক্ষে একটি পরমাণবিক সংঘটন ; অর্থাৎ মৌলের পরমাণুগুলি $\alpha$ বা $\beta$ বিঘটনের ফলে রূপান্তরিত হয়। সুতরাং তেজস্ক্রিয় মৌলের পরমাণুগুলির রূপান্তরের হার (Rate of Transformation) নির্ভর করে যে কোন মুহূর্তে মৌলের মধ্যে বর্তমান পরমাণু সংখ্যার উপর। মনে করা যাক যে একটি মৌল P তেজস্ক্রিয় বিঘটনের ফলে অন্য একটি মৌল Q-তে রূপান্তরিত হয়ে যায় ; অর্থাৎ

$$P \rightarrow Q$$

স্পষ্টতঃ P মৌলটির পরমাণুর সংখ্যা ক্রমশঃ হ্রাস পায় এবং Q মৌলের পরমাণুর সংখ্যা ক্রমশঃ বৃদ্ধি পায়। যে কোন মুহূর্তে যদি P পরমাণুর সংখ্যা $N$ হয়, তাহলে সময়ের সংগে $N$ সংখ্যাটির পরিবর্তনের হার $N$-এর সমানুপাতিক হয়। অর্থাৎ

$$\frac{dN}{dt} \propto N$$

সুতরাং লেখা যায়

$$\frac{dN}{dt} = -\lambda N \qquad (11·3)$$

এখানে $\lambda$ একটি ধ্রুবক। একে বলা হয় বিঘটন ধ্রুবক (Disintegration

constant)। (11·3) সমীকরণের ডান দিকে ঋণাত্মক চিহ্ন দ্বারা সময়ের সংগে $N$-এর হ্রাস নির্দেশ করা হয়। (11·3) সমীকরণকে সমাকলন করলে পাওয়া যায়

$$N = N_0 e^{-\lambda t} \tag{11·4}$$

$t=0$ সময়ে $N=N_0$ হয়, অর্থাৎ $N_0$ ধ্রুবকটি হচ্ছে পরীক্ষা আরম্ভ করার সময়ে বর্তমান P পরমাণুর সংখ্যা। সমীকরণ (11·4) থেকে ক্রুক্স্ কর্তৃক পরীক্ষার দ্বারা প্রাপ্ত সমীকরণ (11·1) সহজেই পাওয়া যায়। আগেই দেখা গেছে যে তেজস্ক্রিয়তার পরিমাপ বলতে বোঝায় নিঃসৃত বিকিরণের তীব্রতা ; এই তীব্রতা নির্ভর করে তেজস্ক্রিয় পরমাণুগুলির সংখ্যা পরিবর্তনের হারের উপর। অর্থাৎ তেজস্ক্রিয়তা $A$ হচ্ছে

$$A = \frac{dN}{dt} = \lambda N = \lambda N_0 e^{-\lambda t} = A_0 e^{-\lambda t}$$

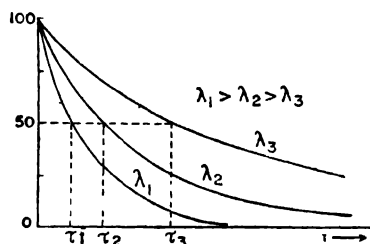
এই সমীকরণ (11·1) সমীকরণ থেকে অভিন্ন। তেজস্ক্রিয়তার মান সময়ের সংগে 'সূচক-সূত্র' (Exponential Law) অনুসারে হ্রাস পায়।

মনে করা যাক যে $\tau$ সময় পরে তেজস্ক্রিয় পরমাণুগুলির সংখ্যা প্রাথমিক সংখ্যার অর্ধেক হয়ে যায়। অর্থাৎ যখন $t=\tau$ হয়, তখন $N=N_0/2$ হয়। সুতরাং সমীকরণ (11·4) থেকে পাওয়া যায়

$$N_0/2 = N_0 e^{-\lambda\tau}$$

$$\tau = \frac{\ln 2}{\lambda} = \frac{0·693}{\lambda} \tag{11·5}$$

$\tau$-কে বলা হয় 'বিঘটনের অর্ধজীবনকাল' (Half Life of Disintegration)। $\tau$-এর সংগে $\lambda$ বিঘটন-ধ্রুবকের সম্পর্ক (11·5) সমীকরণ দ্বারা নির্ধারিত হয়। (11·4) এবং (11·5) সমীকরণ অনুযায়ী অর্ধ-জীবনকাল $\tau$ যত ক্ষুদ্র হয়, অর্থাৎ $\lambda$ যত উচ্চ হয়, তেজস্ক্রিয় মৌলটির পরমাণুগুলি তত তাড়াতাড়ি বিঘটিত হয়। যে সব মৌলের $\tau$ খুব দীর্ঘ হয় (যথা ইউরেনিয়াম বা থোরিয়াম), অর্থাৎ $\lambda$ খুব ক্ষুদ্র হয়, তাদের পরমাণুগুলি খুব নিম্নহারে ক্ষয় প্রাপ্ত হয়। প্রতিটি তেজস্ক্রিয় মৌলের ক্ষেত্রে $\tau$ এবং $\lambda$ সংখ্যা দুটির নির্দিষ্ট মান থাকে (11·3 চিত্র দ্রষ্টব্য)। যেহেতু $\tau$ সময় পরে তেজস্ক্রিয় পরমাণুর সংখ্যা প্রাথমিক সংখ্যার

(অর্থাৎ পরীক্ষা আরম্ভের সময় বর্তমান সংখ্যার) অর্ধেক হয়ে যায়,

চিত্র 11·3

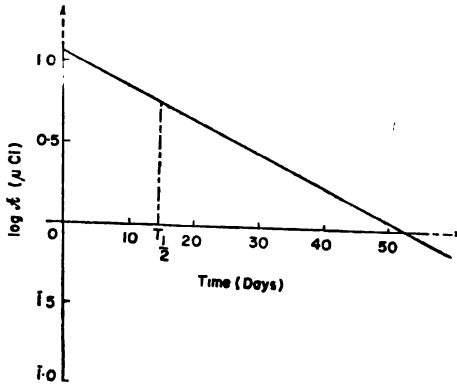
বিভিন্ন অর্ধজীবনকাল সম্পন্ন তেজস্ক্রিয় পদার্থের অবক্ষয়ের লেখচিত্র।

স্পষ্টতঃ 2τ সময় পরে এই সংখ্যা প্রাথমিক সংখ্যার $\frac{1}{2^2}$ বা এক চতুর্থাংশ হয়; 3τ সময় পরে $\frac{1}{2^3}$ বা এক অষ্টমাংশ হয়; ইত্যাদি। অর্থাৎ $n\tau$ সময় পরে তেজস্ক্রিয় পরমাণুর সংখ্যা প্রাথমিক সংখ্যার $\frac{1}{2^n}$ হয়ে যায়। সমীকরণ (11·1) অনুযায়ী নিঃসৃত বিকিরণের তীব্রতাও τ সময় পরে প্রাথমিক তীব্রতার অর্ধেক, 2τ সময় পরে $\frac{1}{4}$, 3τ সময় পরে $\frac{1}{8}$, ইত্যাদি হয়ে যায়। সমীকরণ (11·1) থেকে পাওয়া যায়

$$\ln A = \ln A_0 - \lambda t \tag{11·6}$$

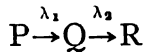
সুতরাং সময়ের সংগে নিঃসৃত রশ্মির তীব্রতার লগারিদ্‌মের (Logarithm) লেখচিত্র একটি সরলরেখা হয়। এই সরলরেখার নতি (Slope) হচ্ছে $\lambda$, অর্থাৎ বিঘটন-ধ্রুবকের সমান (11·4 চিত্র দ্রষ্টব্য)। বস্তুতঃ এইরূপ লেখচিত্র থেকেই $\lambda$ এবং তার থেকে অর্ধজীবনকাল τ পরিমাপ করা হয়।

অসীম সময় ($t = \infty$) পরে $N = 0$ এবং $A = 0$ হয়। অর্থাৎ অসীম সময় পরে তেজস্ক্রিয় পদার্থের পরমাণুর সংখ্যা শূন্য হয়, এবং তেজস্ক্রিয়তা সম্পূর্ণ বিলুপ্ত হয়। ব্যবহারিক ক্ষেত্রে অবশ্য দশ বা বার অর্ধজীবনকাল পরে অবিঘটিত তেজস্ক্রিয় পরমাণুর সংখ্যা প্রাথমিক সংখ্যার তুলনায় এত হ্রাস পেয়ে যায় যে তা প্রায় উপেক্ষণীয় মনে করা যায়।

উপরের আলোচনায় P মৌলের বিঘটনের ফলে উৎপন্ন Q মৌলের

চিত্র 11·4

log $A$ এবং সময়ের লেখচিত্র। $A$ হচ্ছে তেজস্ক্রিয়তা। এটি হচ্ছে কৃত্রিম তেজস্ক্রিয় পদার্থ $P^{32}$এর অবক্ষয় নির্দেশক লেখচিত্র। অর্ধজীবনকাল হচ্ছে 14·5 দিন। এই সরলরেখার নতি হচ্ছে 0·4343$\lambda$।

তেজস্ক্রিয়তা সম্বন্ধে কোন কথা বলা হয় নি। Q মৌলটি স্থায়ী (Stable) অথবা তেজস্ক্রিয় হতে পারে। যদি তেজস্ক্রিয় হয়, তাহলে বিঘটনের ফলে এটি তৃতীয় একটি (R) মৌলে রূপান্তরিত হয়। অর্থাৎ P ও Q এর ক্রমায়াত (Successive) রূপান্তর নিম্নলিখিত সমীকরণ দ্বারা প্রকাশ করা যায়

$$P \xrightarrow{\lambda_1} Q \xrightarrow{\lambda_2} R$$

তেজস্ক্রিয় বিঘটনের ফলে P থেকে Q মৌলে রূপান্তরের হার নির্ধারিত হয় $\lambda_1$ বিঘটন-ধ্রুবক দ্বারা ; অপরপক্ষে Q থেকে R মৌলে রূপান্তরের হার নির্ভর করে $\lambda_2$ বিঘটন-ধ্রুবকের উপর। প্রতি সেকেণ্ডে যতগুলি P পরমাণু বিঘটিত হয় ঠিক ততগুলি Q পরমাণু সৃষ্ট হয়। যদি কোন মুহূর্তে $N_1$ হয় P পরমাণুর সংখ্যা, তাহলে সমীকরণ (11·3) অনুযায়ী ঐ মুহূর্তে P পরমাণুর বিঘটনের হার হয়

$$\frac{dN_1}{dt} = -\lambda_1 N_1 \qquad (11{\cdot}3a)$$

স্পষ্টতঃ Q পরমাণু সৃষ্টির হারও $\lambda_1 N_1$ হয়। Q পরমাণুগুলিও বিঘটিত হয়। যদি ঐ একই মুহূর্তে $N_2$ হয় Q পরমাণুর সংখ্যা তাহলে (11·3) সমীকরণ অনুযায়ী Q পরমাণুর বিঘটনের হার $\lambda_2 N_2$ হয়। স্পষ্টতঃ Q পরমাণুগুলির সংখ্যা পরিবর্তনের হার উপরোক্ত দুটি হারের অন্তরফলের সমান। সুতরাং আমরা লিখতে পারি

$$\frac{dN_2}{dt} = \lambda_1 N_1 - \lambda_2 N_2 \qquad (11{\cdot}7)$$

সমীকরণ (11·3$a$) থেকে পাওয়া যায়

$$N_1 = N_{10} e^{-\lambda_1 t} \qquad (11{\cdot}4a)$$

$N_{10}$ হচ্ছে P পরমাণুর প্রাথমিক সংখ্যা।

(11·7) সমীকরণটি সহজেই সমাকলন করা যায়। যদি লেখা যায় $N_2 = f(t)e^{-\lambda_2 t}$, তাহলে আমরা পাই

$$\frac{dN_2}{dt} = \frac{df}{dt}\, e^{-\lambda_2 t} - \lambda_2 f e^{-\lambda_2 t}$$

অতএব (11·7) সমীকরণ থেকে পাওয়া যায়

$$\frac{df}{dt}\, e^{-\lambda_2 t} - \lambda_2 f e^{-\lambda_2 t} = \lambda_1 N_1 - \lambda_2 N_2 = \lambda_1 N_1 - \lambda_2 f e^{-\lambda_2 t}$$

সুতরাং $$\frac{df}{dt} = \lambda_1 N_1 e^{\lambda_2} = \lambda_1 N_{10} e^{-(\lambda_1 - \lambda_2)t}$$

এবং $$f(t) = -\frac{\lambda_1}{\lambda_1 - \lambda_2} N_{10} e^{-(\lambda_1 - \lambda_2)t} + C_1$$

$C_1$ হচ্ছে সমাকলন ধ্রুবক (Integration constant)। যদি ধরা যায় যে $t=0$ সময়ে Q পরমাণুর সংখ্যা $N_2 = 0$ হয়, অর্থাৎ $f(0)=0$ হয়, তাহলে আমরা পাই

$$C_1 = \frac{\lambda_1}{\lambda_1 - \lambda_2} N_{10}$$

অতএব পাওয়া যায়

$$f(t) = \frac{\lambda_1}{\lambda_1 - \lambda_2} N_{10} \left[1 - e^{-(\lambda_1 - \lambda_2)t}\right]$$

সুতরাং

$$N_2 = \frac{\lambda_1 N_{10}}{\lambda_1 - \lambda_2}\left[e^{-\lambda_2 t} - e^{-\lambda_1 t}\right] \qquad (11\cdot8)$$

সমীকরণ (11·8) থেকে সময়ের সংগে Q পরমাণুর সংখ্যা $N_2$ কিভাবে পরিবর্তিত হয় তা বোঝা যায়। পরীক্ষারম্ভের সময়ে, অর্থাৎ $t=0$ সময়ে, $N_2=0$ হয়। পরীক্ষারম্ভের নির্দিষ্ট সময় $t_m$ পরে $N_2$ সর্বোচ্চ হয়। (11·8) সমীকরণকে অবকলন করে $t_m$ সংখ্যাটির মান পাওয়া যায় ঃ

$$\left(\frac{dN_2}{dt}\right)_{tm} = \frac{\lambda_1 N_{10}}{\lambda_1 - \lambda_2}\left[-\lambda_2 e^{-\lambda_2 t} + \lambda_1 e^{-\lambda_1 t}\right]_{t_m} = 0$$

অথবা $\qquad \lambda_2 e^{-\lambda_2 t_m} = \lambda_1 e^{-\lambda_1 t_m}$

এর থেকে পাওয়া যায়

$$e^{(\lambda_1 - \lambda_2)t_m} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2}$$

সুতরাং $\qquad t_m = \frac{1}{\lambda_1 - \lambda_2} \ln \frac{\lambda_1}{\lambda_2} \qquad (11\cdot9)$

$t_m$ সময় পরে যে স্রষ্টা মৌলের সংখ্যা $N_2$ সর্বোচ্চ হয় তা $t=t_m$ সময়ে $\frac{d^2N_2}{dt^2}$ সংখ্যাটির মান নিরূপণ করলে বোঝা যায়। দেখা যায় যে এই সংখ্যাটি ঋণাত্মক হয়।

অনেক ক্ষেত্রে দেখা যায় যে Q পরমাণুর বিঘটনের ফলে সৃষ্ট R পরমাণুগুলিও তেজস্ক্রিয় হয়। আবার R থেকে সৃষ্ট S পরমাণুগুলিও তেজস্ক্রিয় হতে পারে। এইভাবে কয়েকটি ক্রমায়াত (Successive) তেজস্ক্রিয় রূপান্তর বিবেচনা করলে লেখা যায় $P \xrightarrow{\lambda_1} Q \xrightarrow{\lambda_2} R \xrightarrow{\lambda_3} S \xrightarrow{\lambda_4}$ ইত্যাদি।

যদি $\lambda_1$, $\lambda_2$, $\lambda_3$ ইত্যাদি এবং $N_1$, $N_2$, $N_3$, ইত্যাদি যথাক্রমে P, Q, R প্রভৃতি মৌলের বিঘটন-ধ্রুবক এবং $t$ সময়ে পরমাণুসংখ্যা হয়, তাহলে আমরা পাই,

$$\frac{dN_1}{dt} = -\lambda_1 N_1$$

$$\frac{dN_2}{dt} = \lambda_1 N_1 - \lambda_2 N_2$$

$$\frac{dN_3}{dt} = \lambda_2 N_2 - \lambda_3 N_3$$

$$\cdots \quad \cdots \quad \cdots \quad \cdots$$

$$\frac{dN_n}{dt} = \lambda_{n-1} N_{n-1} - \lambda_n N_n$$

বেট্‌ম্যান (Bateman) সর্বপ্রথম এই অবকল-সমীকরণগুলির সমাধান করেন। তিনি ধরে নেন যে শুরুতে P ছাড়া অন্য মৌলগুলির পরমাণু সংখ্যা শূন্য হয়। অর্থাৎ $t=0$ সময়ে $N_1 = N_{10}$, $N_2 = N_3 = \cdots = N_n = 0$ হয়।

যদি মাত্র তিন ধাপ ক্রমায়াত বিঘটন ঘটে, অর্থাৎ S মৌলটি স্থায়ী (Stable) হয়, তাহলে উপরের সমীকরণগুলির মধ্যে প্রথম তিনটি বিবেচনা করলেই চলে। (11·8) সমীকরণের সাহায্যে এক্ষেত্রে আমরা তৃতীয় সমীকরণটিকে লিখতে পারি

$$\frac{dN_3}{dt} = \lambda_2 N_2 - \lambda_3 N_3 = \frac{\lambda_1 \lambda_2 N_{10}}{\lambda_1 - \lambda_2}\left[e^{-\lambda_2 t} - e^{-\lambda_1 t}\right] - \lambda_3 N_3$$

$e^{\lambda_3 t}$ দিয়ে গুণ করে পাওয়া যায়

$$\frac{dN_3}{dt} e^{\lambda_3 t} + \lambda_3 N_3 e^{\lambda_3 t} = \frac{d}{dt}(N_3 e^{\lambda_3 t})$$

$$= \frac{\lambda_1 \lambda_2 N_{10}}{\lambda_1 - \lambda_2}\left[e^{-\lambda_2 t} - e^{-\lambda_1 t}\right] e^{\lambda_3 t}$$

সমাকলন করে পাওয়া যায়

$$N_3 e^{\lambda_3 t} = \frac{\lambda_1 \lambda_2 N_{10}}{\lambda_1 - \lambda_2}\left[\frac{e^{(\lambda_3 - \lambda_2)t}}{\lambda_3 - \lambda_2} - \frac{e^{(\lambda_3 - \lambda_1)t}}{\lambda_3 - \lambda_1}\right] + C$$

$C$ হচ্ছে সমাকলন ধ্রুবক। যেহেতু $t=0$ সময়ে $N_3 = 0$ হয়, অতএব

$$\frac{\lambda_1 \lambda_2 N_{10}}{\lambda_1 - \lambda_2} \cdot \frac{\lambda_2 - \lambda_1}{(\lambda_3 - \lambda_1)(\lambda_3 - \lambda_2)} + C = 0.$$

অর্থাৎ
$$C = \frac{\lambda_1 \lambda_2 N_{10}}{(\lambda_3 - \lambda_1)(\lambda_3 - \lambda_2)}$$

সুতরাং $$N_3=\lambda_1\lambda_2N_{10}[C_1e^{-\lambda_1t}+C_2e^{-\lambda_2t}+C_3e^{-\lambda_3t}]$$

এখানে $$C_1=\frac{1}{(\lambda_2-\lambda_1)(\lambda_3-\lambda_1)},\ C_2=\frac{1}{(\lambda_1-\lambda_2)(\lambda_3-\lambda_2)},$$

$$C_3=\frac{1}{(\lambda_1-\lambda_3)(\lambda_2-\lambda_3)}$$

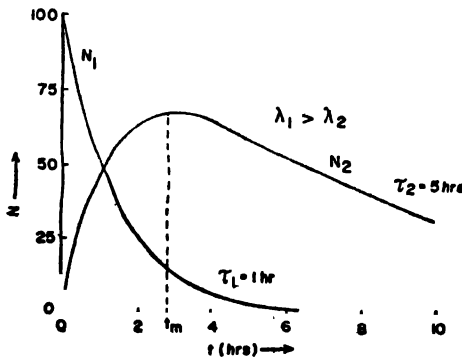
অনুরূপে অধিকতর সংখ্যক ক্রমায়াত বিঘটনের ক্ষেত্রে $n$ ক্রমের মৌলের পরমাণুসংখ্যা পাওয়া যায়

$$N_n=N_{10}\ [C_1e^{-\lambda_1t}+C_2e^{-\lambda_2t}+C_3e^{-\lambda_3t}+\cdots+C_ne^{-\lambda_nt}] \tag{11.10}$$

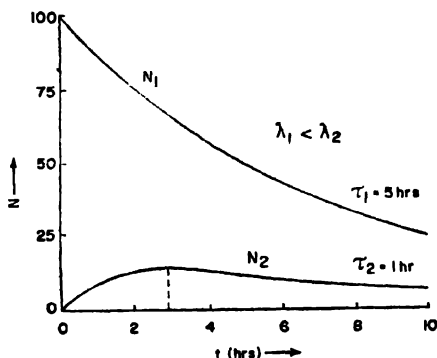
এখানে $$C_1=\frac{\lambda_1\lambda_2\cdots\cdots\lambda_{n-1}}{(\lambda_2-\lambda_1)(\lambda_3-\lambda_1)\cdots\cdots(\lambda_n-\lambda_1)}$$

$$C_2=\frac{\lambda_1\lambda_2\lambda_3\cdots\cdots\lambda_{n-1}}{(\lambda_1-\lambda_2)(\lambda_3-\lambda_2)\cdots\cdots(\lambda_n-\lambda_2)}$$ ইত্যাদি

## 11. 5 : তেজস্ক্রিয় স্থিতাবস্থা

সাধারণতঃ বিভিন্ন তেজস্ক্রিয় মৌলের বিঘটন ধ্রুবক পৃথক হয়। (11·5) এবং (11·6) চিত্র দুটিতে যথাক্রমে $\lambda_1>\lambda_2$ এবং $\lambda_1<\lambda_2$,

চিত্র 11·5

দুটি তেজস্ক্রিয় পদার্থের ক্রমায়ত বিঘটন (successive disintegration)। সৃষ্টা মৌলের অর্ধজীবনকাল হচ্ছে $\tau_1=1$ ঘণ্টা এবং সৃষ্ট মৌলের অর্ধজীবনকাল হচ্ছে $\tau_2=5$ ঘণ্টা। প্রারম্ভে, অর্থাৎ $t=0$ সময়ে, কেবল সৃষ্টা মৌলের অস্তিত্ব ছিল।

দুই ক্ষেত্রে সময়ের সংগে $N_2$ সংখ্যাটির পরিবর্তনের লেখচিত্র প্রদর্শিত হয়েছে। P মৌলটিকে বলা হয় 'স্রষ্টা মৌল' (Parent Element) আর Q মৌলকে বলা হয় 'সৃষ্ট মৌল' (Daughter Element)।

চিত্র 11·6

সাময়িক তেজস্ক্রিয় স্থিতাবস্থার নিদর্শন। প্রারম্ভে শুধু স্রষ্টা মৌলের অস্তিত্ব ছিল। এর অর্ধজীবনকাল হচ্ছে $\tau_1 = 5$ ঘণ্টা। সৃষ্ট মৌলের অর্ধজীবনকাল হচ্ছে $\tau_2 = 1$ ঘণ্টা। দীর্ঘ সময় পরে স্রষ্টা এবং সৃষ্ট উভয়েই স্রষ্টা পদার্থের অর্ধজীবনকাল সহকারে বিঘটিত হতে থাকে।

লেখচিত্র দুটি থেকে প্রতীয়মান হয় যে সৃষ্ট মৌলের পরমাণু সংখ্যা $t=0$ সময়ে শূন্য থেকে আরম্ভ করে $t=t_m$ সময়ে বৃহত্তম মান পর্য্যন্ত বৃদ্ধি পায়। তারপর এই সংখ্যা হ্রাস পেতে থাকে। এই হ্রাস সূচক সূত্রানুযায়ী হয়। প্রথম ক্ষেত্রে, অর্থাৎ $\lambda_1 > \lambda_2$ বা $\tau_1 < \tau_2$ হলে, স্রষ্টা মৌল অপেক্ষা সৃষ্ট মৌল অধিকতর দীর্ঘজীবী হয়; তখন এই সূচক-হ্রাস (Exponential Decrease) সৃষ্ট মৌলের অর্ধ-জীবনকাল $\tau_2$ অনুযায়ী হয়। দ্বিতীয় ক্ষেত্রে, অর্থাৎ $\lambda_1 < \lambda_2$ বা $\tau_1 > \tau_2$ হলে, স্রষ্টা মৌল অধিকতর দীর্ঘজীবী হয়; তখন এই হ্রাস স্রষ্টা মৌলের অর্ধজীবনকাল $\tau_1$ অনুযায়ী হয়।

### (ক) সাময়িক স্থিতাবস্থা :

যদি $\tau_1 > \tau_2$ হয়, অর্থাৎ স্রষ্টা মৌল সৃষ্ট মৌলের তুলনায় অধিকতর দীর্ঘজীবী হয়, তাহলে স্রষ্টা এবং সৃষ্ট পরমাণু সংখ্যার মধ্যে একটা 'সাময়িক স্থিতাবস্থার' (Transient Equilibrium) সৃষ্টি হয়।

এক্ষেত্রে যদি $t \gg \tau_2$ হয়, তাহলে স্পষ্টতঃ $\lambda_2 t \gg 1$ হয় এবং (11·8) সমীকরণে $e^{-\lambda_1 t}$ এর তুলনায় $e^{-\lambda_2 t}$ পদটি উপেক্ষণীয় হয়। সুতরাং উক্ত সমীকরণ থেকে পাওয়া যায়

$$N_2 = \frac{\lambda_1 N_{10}}{\lambda_2 - \lambda_1} e^{-\lambda_1 t}$$

সুতরাং সৃষ্ট পরমাণুর সংখ্যা বৃহত্তম হবার পর স্রষ্টা এবং সৃষ্ট উভয় প্রকার পরমাণুর সংখ্যাই স্রষ্টা মৌলের অর্ধজীবন কাল $\tau_1$ অনুযায়ী হ্রাস পেতে থাকে। এক্ষেত্রে সৃষ্ট এবং স্রষ্টা পরমাণুর সংখ্যার অনুপাত হয়

$$\frac{N_2}{N_1} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} = \text{ধ্রুবক}$$

যেহেতু P এবং Q মৌলদ্বয়ের তেজস্ক্রিয়তা তাদের পরমাণু সংখ্যার সমানুপাতিক, সুতরাং সাময়িক স্থিতাবস্থার ক্ষেত্রে এই দুই প্রকার মৌলের তেজস্ক্রিয়তার অনুপাতও ধ্রুবক হয়।

**(খ) দীর্ঘস্থায়ী স্থিতাবস্থা ঃ**

যখন স্রষ্টা মৌলের অর্ধজীবনকাল সৃষ্ট মৌলের তুলনায় অনেক বেশী হয়, অর্থাৎ $\tau_1 \gg \tau_2$ এবং $\lambda_1 \ll \lambda_2$ হয়, তখন স্রষ্টা এবং সৃষ্ট পরমাণুর সংখ্যার মধ্যে যে স্থিতাবস্থা দেখা যায় তাকে বলা হয় দীর্ঘস্থায়ী স্থিতাবস্থা (Secular Equilibrium)। এক্ষেত্রে স্রষ্টা মৌলের অর্ধ-জীবনকাল এত দীর্ঘ হয় যে পরীক্ষাগারে নিরীক্ষণকালের মধ্যে স্রষ্টা পরমাণুর সংখ্যার হ্রাস উপেক্ষা করা যেতে পারে। অর্থাৎ $t \ll \tau_1$ হয়; সুতরাং $\lambda_1 t \ll 1$ হয়। এবং এক্ষেত্রে $e^{-\lambda_1 t} \simeq 1$ লেখা যায়। অতএব সমীকরণ (11·8) থেকে পাওয়া যায়

$$N_2 = \frac{\lambda_1}{\lambda_2} N_{10} (1 - e^{-\lambda_2 t}) \qquad (11\cdot11)$$

সমীকরণ (11·11) থেকে দেখা যায় যে সৃষ্ট পরমাণুর সংখ্যা সূচক-সূত্র অনুসারে বৃদ্ধি পায়। স্পষ্টতঃ সৃষ্ট মৌলের তেজস্ক্রিয়তাও একই সূত্রানুযায়ী বৃদ্ধি পায়। ক্রুক্‌স্‌ কর্তৃক ইউরেনিয়াম থেকে পৃথকীকৃত UX মৌলের তেজস্ক্রিয়তা যে উপরোক্ত গাণিতিক সূত্রানুযায়ী বৃদ্ধি প্রাপ্ত হয় একথা আগেই বলা হয়েছে।

যদি নিরীক্ষণকাল সৃষ্ট মৌলের অর্ধজীবনকালের তুলনায় অনেক বেশী দীর্ঘ হয়, অর্থাৎ $t \gg \tau_2$ হয়, তাহলে লেখা যায়

$$N_2 = \frac{\lambda_1}{\lambda_2} N_{10} = N_{20} \text{ ( ধরা যাক )} \qquad (11 \cdot 12)$$

স্পষ্টতঃ দীর্ঘ সময় পরে, সৃষ্ট পরমাণুর সংখ্যা $N_{20}$ ধ্রুবক হয়ে যায়। এই অবস্থায়, নিরীক্ষণ কালের মধ্যে স্রষ্টা এবং সৃষ্ট পরমাণু, উভয়ের সংখ্যাই ধ্রুবক থাকে বলে মনে করা যেতে পারে। সেইজন্য এই অবস্থাকে বলা হয় 'দীর্ঘস্থায়ী স্থিতাবস্থা' (Secular Equilibrium)। সমীকরণ (11·12) থেকে পাওয়া যায়

$$\frac{N_{20}}{N_{10}} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2} = \frac{\tau_2}{\tau_1} \qquad (11 \cdot 13)$$

অর্থাৎ সৃষ্ট ও স্রষ্টা পরমাণু সংখ্যার অনুপাত এক্ষেত্রেও ধ্রুবক হয়। যেহেতু $\tau_2 \ll \tau_1$, অতএব $N_{20} \ll N_{10}$ হয় ; অর্থাৎ দীর্ঘস্থায়ী স্থিতাবস্থায় বর্তমান সৃষ্ট পরমাণুর মোট সংখ্যা স্রষ্টা পরমাণুর মোট সংখ্যা অপেক্ষা অনেক কম হয়। (11·13) সমীকরণ থেকে পাওয়া যায়

$$\lambda_1 N_{10} = \lambda_2 N_{20} \qquad (11 \cdot 14)$$

সুতরাং যদিও সৃষ্ট মৌলের পরমাণু সংখ্যা স্রষ্টার তুলনায় অনেক কম হয়, তবুও উভয় প্রকার মৌলের তেজস্ক্রিয়তা এক্ষেত্রে সমান হয়, অর্থাৎ $A_{10} = A_{20}$ হয়। (11·2) চিত্রে দীর্ঘস্থায়ী স্থিতাবস্থার ফলে UX মৌলের তেজস্ক্রিয়তার মান যে দীর্ঘ সময় পরে ধ্রুবক হয়ে যায় তা দেখান হয়েছে। এখানে উল্লেখযোগ্য যে সমীকরণ (11·11) অনুযায়ী সৃষ্ট পরমাণুর তেজস্ক্রিয়তা এর নিজস্ব অর্ধজীবনকাল অনুযায়ী বৃদ্ধি পায়। (11·2) চিত্রে UX মৌলের তেজস্ক্রিয়তার সূচক বৃদ্ধির (Exponential Increase) যে লেখচিত্র প্রদর্শিত হয়েছে তা এই মৌলের অর্ধজীবনকাল অনুযায়ীই ঘটে।

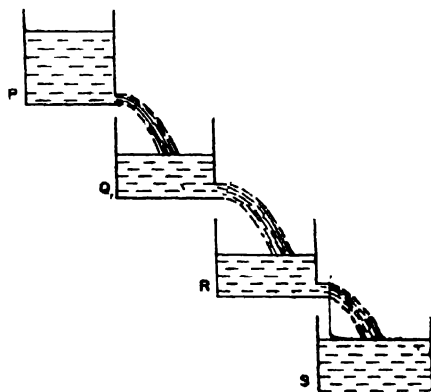
ইতিপূর্বে আমরা কয়েকটি ক্রমায়াত (Successive) তেজস্ক্রিয় রূপান্তরের কথা আলোচনা করেছি। এক্ষেত্রে যদি মনে করা হয় স্রষ্টা মৌল P-এর অর্ধজীবনকাল অন্য যে কোন সৃষ্ট মৌলের তুলনায় অনেক বেশী দীর্ঘ, অর্থাৎ $\tau_1 \gg \tau_2$, $\tau_3$, $\tau_4$, ইত্যাদি বা $\lambda_1 \ll \lambda_2$, $\lambda_3$, $\lambda_4$ ইত্যাদি হয়, তাহলে সৃষ্ট মৌলগুলির অর্ধজীবনকালের তুলনায় অনেক

বেশী দীর্ঘ সময় পরে স্রষ্টা এবং বিভিন্ন সৃষ্ট মৌলগুলির মধ্যে দীর্ঘস্থায়ী স্থিতাবস্থার সৃষ্টি হয়। কারণ (11·13) সমীকরণ অনুযায়ী দীর্ঘ সময় পরে প্রথম সৃষ্ট Q মৌলের পরমাণুসংখ্যা ধ্রুবক হয়ে যায়। অতএব এর বিঘটন হারও ধ্রুবক হয়। সুতরাং এর থেকে সৃষ্ট পরবর্তী R মৌলের পরমাণু সৃষ্টির হারও ধ্রুবক হয়। অতএব দীর্ঘ সময় পরে R মৌলের পরমণু-সংখ্যাও ধ্রুবক হয়। অনুরূপে পরবর্তী সৃষ্ট মৌলগুলির পরমাণুসংখ্যাও ধ্রুবক হয়। যদি $N_{20}$, $N_{30}$, ইত্যাদি দীর্ঘ সময় পরে বিভিন্ন সৃষ্ট পরমাণুগুলির সংখ্যা হয়, তাহলে (11·10) সমীকরণের সাহায্যে দেখা যায় যে $\tau_1$-এর তুলনায় কমক্ষণ স্থায়ী নিরীক্ষণকালের মধ্যে ($t \leqslant \tau_1$), উপরোক্ত সংখ্যাগুলি ধ্রুবক হয়। তাছাড়া স্রষ্টা এবং সৃষ্ট মৌলগুলির তেজস্ক্রিয়তাও এইরূপ স্থিতাবস্থায় পরস্পরের সমান হয়। অর্থাৎ

$$\lambda_1 N_{10} = \lambda_2 N_{20} = \lambda_3 N_{30} = \lambda_4 N_{40} = \cdots \quad (11{\cdot}15)$$

এখানে উল্লেখযোগ্য যে স্রষ্টা মৌলটি এবং বিভিন্ন সৃষ্ট মৌলগুলি যতক্ষণ একত্রে থাকে ততক্ষণ তাদের মধ্যে স্থিতাবস্থা বজায় থাকে। যদি একটি সৃষ্ট মৌলকে কোন উপায়ে পৃথকীকৃত করা যায়, তাহলে সেটির সংগে স্রষ্টা মৌলের স্থিতাবস্থার অবসান ঘটে। সৃষ্ট মৌলটির পরমাণুর সংখ্যা তখন আবার নূতন করে বৃদ্ধি পেতে পেতে পূর্বের মত স্থিতাবস্থার মান প্রাপ্ত হয়। অপেক্ষাকৃত কম অর্ধজীবনকাল সম্পন্ন যে কোন সৃষ্ট মৌলকে এইভাবে বার বার স্রষ্টা মৌল থেকে পৃথকীকৃত করা সম্ভব। উদাহরণস্বরূপ 1620 বৎসর অর্ধজীবনকাল সম্পন্ন তেজস্ক্রিয় মৌল রেডিয়াম থেকে 3·82 দিন অর্ধজীবনকাল সম্পন্ন রেডন নামক তেজস্ক্রিয় গ্যাস কয়েকদিন অন্তর বারবার পৃথকীকৃত করে ক্যানসার প্রভৃতি রোগের চিকিৎসার ক্ষেত্রে ব্যবহারিক প্রয়োজনে লাগান হয়। এখানে উল্লেখযোগ্য যে, সমীকরণ (11·11) অনুযায়ী সৃষ্ট মৌলের পরমাণু সংখ্যা প্রায় স্থিতাবস্থার মান ($N_{20}$) প্রাপ্ত হয় উক্ত মৌলের দশ-বার অর্ধজীবনকাল পরে।

ক্রমায়াত তেজস্ক্রিয় রূপান্তরের ক্ষেত্রে তেজস্ক্রিয়তার বৃদ্ধি এবং হ্রাস নিম্নে আলোচিত উদ্‌গতীয় (Hydrodynamic) সংঘটনের সঙ্গে তুলনা করা যায়। মনে করা যাক যে, P, Q, R ···ইত্যাদি কতকগুলি সছিদ্র পাত্র একটির উপরে আর একটি এইভাবে স্থাপিত আছে (11·7 চিত্র দ্রষ্টব্য)। যদি সবগুলি পাত্রের ছিদ্র প্রথমে বন্ধ রেখে শুধু উপরের পাত্রে কিছুটা জল ঢালা যায় এবং তার পরে ছিদ্রগুলি সব একসঙ্গে খুলে দেওয়া যায়, তাহলে

প্রথমে উপরের পাত্র P থেকে জল নির্গত হয়ে Q পাত্রে প্রবেশ করে। ফলে Q পাত্রে জলের তল প্রথমে ক্রমশঃ উচ্চে উঠতে থাকে। কত তাড়াতাড়ি

চিত্র 11·7
তেজস্ক্রিয় শ্রেণীভুক্ত মৌল সমূহের তেজস্ক্রিয়তার হ্রাস ও বৃদ্ধির সংগে উপর উপর স্থাপিত সছিদ্র পাত্র সমূহের মধ্যে জলতল পরিবর্তনের তুলনা।

Q পাত্রের জল-তল উঠতে থাকবে তা নির্ভর করে উক্ত পাত্রের ছিদ্রের আয়তনের উপর। Q পাত্রে জল প্রবেশ করার সংগে সংগে উক্ত পাত্রের ছিদ্র দিয়ে জল নির্গত হয়ে R পাত্রে প্রবেশ করতে আরম্ভ করে। Q পাত্রে জলের তল যত উঠতে থাকে তার থেকে জল নির্গমনের হারও তত বৃদ্ধি পায়। যখন P থেকে Q পাত্রে জল প্রবেশের হার এবং Q থেকে জল নির্গমনের হার সমান হয়, তখন Q পাত্রের জল-তল উচ্চতম হয়। এরপর Q পাত্রের জল-তল নামতে থাকে। এইভাবে প্রত্যেকটি পাত্রের জল-তল প্রথমে উঠতে থাকে এবং একটা উচ্চতম সীমা পর্যন্ত ওঠার পর আবার নামতে থাকে। ঠিক যেমন ক্রমায়াত তেজস্ক্রিয় রূপান্তরের ক্ষেত্রে নির্দিষ্ট কোন তেজস্ক্রিয় মৌলের পরমাণু সংখ্যা একটা উচ্চতম মান পর্যন্ত বৃদ্ধি পাবার পর আবার কমতে থাকে।

## 11.6 : রেডিয়ামের আবিষ্কার

তেজস্ক্রিয়তা আবিষ্কারের অল্প কিছুদিনের মধ্যেই মাদাম কুরী (Madam Curie) লক্ষ্য করেন যে, বিশুদ্ধ ইউরেনিয়াম অপেক্ষা

সমপরিমাণ পিচ্-ব্লেন্ড (Pitch-Blende) নামক ইউরেনিয়ামের আকরিকের (Mineral) তেজস্ক্রিয়তা অনেক বেশী। এর থেকে তিনি সিদ্ধান্ত করেন যে, এই আকরিকের মধ্যে ইউরেনিয়াম ছাড়াও অনেক বেশী তেজস্ক্রিয়তা সম্পন্ন এক বা একাধিক অন্য কোন মৌল নিশ্চয় বর্তমান থাকে। তিনি রাসায়নিক পদ্ধতিতে এই অজ্ঞাত মৌলগুলিকে পৃথক করার চেষ্টা করেন। তাঁর এই প্রচেষ্টার সংগে তাঁর স্বামী অধ্যাপক পিয়ের কুরীও (Pierre Curie) যুক্ত ছিলেন। অনন্যসাধারণ অধ্যবসায়ের সংগে তাঁরা এই প্রচেষ্টায় নিজেদের সর্বশক্তি নিয়োগ করেন। তাঁদের কাজের জন্য বোহেমিয়ার এক খনি থেকে তোলা এক টন পিচ্-ব্লেন্ড তাঁরা অস্ট্রিয়ার যুবরাজের কাছ থেকে যৌতুক হিসাবে পান। এই বহুমূল্য যৌতুকটি পাওয়ার পর তাঁরা কঠোর সাধনায় ব্যাপৃত হন। তাঁদের এই সাধনা বৈজ্ঞানিক গবেষণার ইতিহাসে চিরস্মরণীয় হয়ে আছে।

পিচ্-ব্লেন্ড থেকে রাসায়নিক পদ্ধতিতে বিভিন্ন দ্রব্য পৃথক করার পর ইলেকট্রোস্কোপ (Electroscope) যন্ত্রের সাহায্যে প্রত্যেকটি পৃথকীকৃত দ্রব্যের তেজস্ক্রিয়তা তাঁরা পরিমাপ করেন। পৃথকীকৃত তেজস্ক্রিয় দ্রব্যগুলিকে খুব যত্ন সহকারে আবার রাসায়নিক পদ্ধতিতে বিশ্লেষণ করা হয়। এইভাবে কয়েকটি নূতন তেজস্ক্রিয় রাসায়নিক মৌলের সন্ধান পাওয়া যায়। এদের মধ্যে একটির রাসায়নিক ধর্মাবলী বেরিয়াম ($Z=56$) নামক মৌলের সমতুল্য ছিল। বস্তুতঃ পিচ্-ব্লেন্ডের মধ্যে বর্তমান বেরিয়ামকে রাসায়নিক পদ্ধতিতে পৃথক করার সময় এই তেজস্ক্রিয় মৌলটি এবং বেরিয়াম এক সংগে মিশ্রিত অবস্থায় পৃথকীকৃত হয়। পরে পুনঃ পুনঃ আংশিক কেলাসন (Fractional Crystallization) পদ্ধতির সাহায্যে বেরিয়াম থেকে পৃথকীকৃত করে এই নূতন তেজস্ক্রিয় মৌলটির ক্লোরাইড (Chloride) লবণ বিশুদ্ধ অবস্থায় পাওয়া যায়। এই নূতন মৌলটির নাম দেওয়া হয় 'রেডিয়াম' (Radium)। পরীক্ষা দ্বারা নির্ণয় করে এর পরমাণবিক ভার প্রায় $M=226$ পাওয়া যায়। তাছাড়া পর্যায় সারণীতে (Perodic Table) এই মৌলটির অবস্থান নির্ণয় করা হয়েছে। এর পরমাণবিক সংখ্যা (Atomic Number) $Z=88$ পাওয়া যায়।

এক টনের উপর পিচ্-ব্লেন্ড নিয়ে পরীক্ষা শুরু করে কুরী-দম্পতি মাত্র 200 মিলিগ্রাম পরিমাণ রেডিয়াম ক্লোরাইড পান। এর থেকে কী পরিমাণ পরিশ্রম, অধ্যবসায় ও যত্ন সহকারে তাঁদের এই কাজ সম্পন্ন করতে হয়েছিল তা কিছুটা উপলব্ধি করা যায়।

রেডিয়াম আবিষ্কারের অল্প কিছুদিন আগে মাদাম কুরী পিচ্-ব্লেন্ডের মধ্যে আর একটি নূতন তেজস্ক্রিয় মৌল আবিষ্কার করেন। এই মৌলের পরমাণবিক সংখ্যা $Z=84$ পাওয়া যায়। মাদাম কুরীর স্বদেশ পোল্যাণ্ডের নামানুসারে এই মৌলটির নাম দেওয়া হয় 'পোলোনিয়াম' (Polonium)।

দেখা যায় যে এই নূতন মৌলগুলি ইউরেনিয়াম অপেক্ষা অনেক বেশী তেজস্ক্রিয়। বস্তুতঃ সমপরিমাণ ইউরেনিয়ামের তুলনায় রেডিয়াম প্রায় ত্রিশ লক্ষ ($3\times10^6$) গুণ বেশী তেজস্ক্রিয় হয়। রেডিয়ামের অর্ধজীবনকাল নির্ণয় করে পাওয়া যায় $\tau=1620$ বৎসর ( প্রায় )। পোলোনিয়ামের অর্ধজীবনকাল হচ্ছে প্রায় 139 দিন।

এখানে উল্লেখযোগ্য যে পোলোনিয়াম এবং রেডিয়াম মৌল দুটি ইউরেনিয়াম মৌল থেকে ক্রমায়াত বিঘটনের (Successive Disintegration) ফলে সৃষ্ট হয়। ইউরেনিয়ামের অর্ধজীবনকাল অতি দীর্ঘ। পরিমাণ করে এই অর্ধজীবনকালের মান পাওয়া যায় প্রায় $\tau_U=4{\cdot}5\times10^9$ বৎসর। সুতরাং অপেক্ষাকৃত অনেক কম অর্ধজীবনকাল সম্পন্ন সৃষ্ট মৌলদ্বয়, পোলোনিয়াম এবং রেডিয়াম, স্রষ্টা মৌল ইউরেনিয়ামের সংগে দীর্ঘস্থায়ী স্থিতাবস্থায় (Secular Equilibrium) অবস্থান করে। সেইজন্য পিচ্-ব্লেন্ডের মধ্যে এই মৌলগুলির সন্ধান পাওয়া যায়। স্রষ্টা মৌল ইউরেনিয়ামের তেজস্ক্রিয়তার সংগে পোলোনিয়াম, রেডিয়াম এবং আরও কয়েকটি সৃষ্ট মৌলের তেজস্ক্রিয়তা ( পরবর্তী অনুচ্ছেদ দ্রষ্টব্য ) যুক্ত হওয়ার ফলে পিচ্-ব্লেন্ডের তেজস্ক্রিয়তা বিশুদ্ধ ইউরেনিয়ামের তেজস্ক্রিয়তা অপেক্ষা অনেক বেশী হয়।

যেহেতু স্রষ্টা মৌল ইউরেনিয়ামের তুলনায় সৃষ্ট মৌল রেডিয়াম বা পোলোনিয়ামের অর্ধজীবনকাল অনেক কম হয়, সমীকরণ (11·15) অনুযায়ী দীর্ঘস্থায়ী স্থিতাবস্থায় বর্তমান শেষোক্ত মৌল দুটির পরিমাণ ইউরেনিয়ামের তুলনায় খুবই সামান্য হয়।

উদাহরণস্বরূপ 1000 কিলোগ্রাম ইউরেনিয়াম ধাতুর সংগে দীর্ঘস্থায়ী স্থিতাবস্থায় কী পরিমাণ রেডিয়াম বর্তমান থাকে তা নির্ণয় করা যেতে পারে ঃ

ইউরেনিয়ামের দুটি আইসোটোপ আছে। 238 এবং 235 ভর-সংখ্যা সম্পন্ন এই আইসোটোপ দুটির আপেক্ষিক প্রাচুর্য (Relative Abundance) যথাক্রমে 99·3% এবং 0·7% হয়। রেডিয়ামের ($Ra^{226}$) উৎপত্তি হয় $U^{238}$ আইসোটোপ থেকে।

1000 কিলোগ্রাম ইউরেনিয়ামে $U^{238}$ পরমাণুর সংখ্যা হচ্ছে

$$N_U = \frac{6{\cdot}025 \times 10^{23}}{238} \times 10^6 \times 0{\cdot}993 = 2{\cdot}512 \times 10^{27}$$

সমীকরণ (11·15) থেকে পাওয়া যায় ( যেহেতু $\lambda = \ln 2/\tau$),

$$\frac{N_{Ra}}{\tau_{Ra}} = \frac{N_U}{\tau_U}$$

সুতরাং

$$N_{Ra} = \frac{\tau_{Ra}}{\tau_U} N_U = \frac{1620}{4{\cdot}5 \times 10^9} \times 2{\cdot}512 \times 10^{27} = 9{\cdot}043 \times 10^{20}$$

অতএব $Ra^{226}$এর পরিমাণ হবে

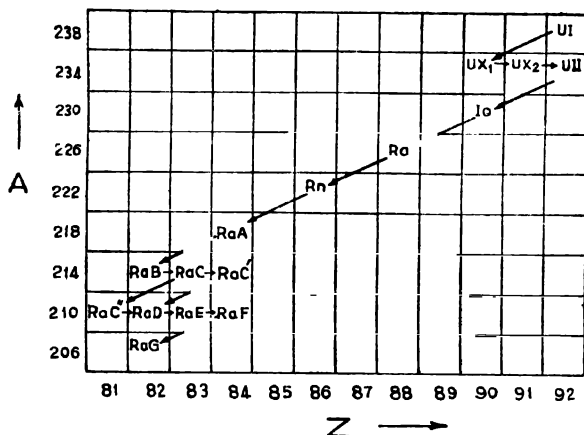
$$M_{Ra} = N_{Ra} \times \frac{226}{6{\cdot}025 \times 10^{23}} = \frac{9{\cdot}043 \times 10^{20} \times 226}{6{\cdot}025 \times 10^{23}}$$

$$= 0{\cdot}34 \text{ গ্রাম}$$

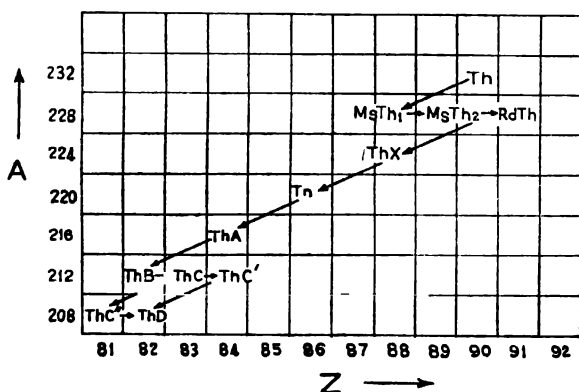
অর্থাৎ 1000 কিলোগ্রাম বা এক মেট্রিক টন $U^{238}$-এর সংগে দীর্ঘস্থায়ী স্থিতাবস্থায় মাত্র 340 মিলিগ্রাম রেডিয়াম বর্তমান থাকে। এই গাণিতিক প্রতিপাদন থেকে সহজেই বোঝা যায় যে, কুরী-দম্পতি তাঁদের পূর্ব-বর্ণিত প্রচেষ্টায় কেন অত অল্প পরিমাণ রেডিয়াম পৃথক করতে সমর্থ হয়েছিলেন।

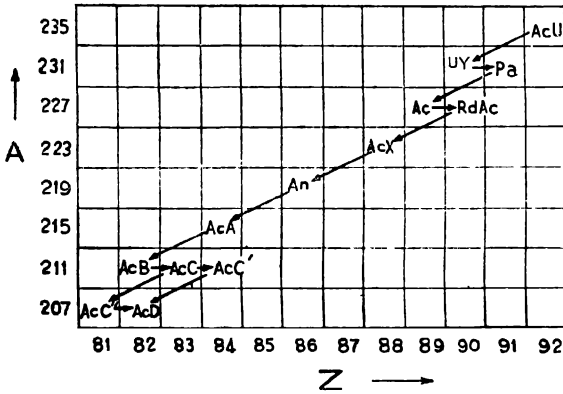
## 11. 7 : তেজস্ক্রিয় শ্রেণী

ইউরেনিয়াম ($Z = 92$) এবং থোরিয়াম ($Z = 90$), এই দুটি প্রকৃতি-লব্ধ মৌল তেজস্ক্রিয়। এদের অর্ধজীবনকাল অতি দীর্ঘ। এই দুটি মৌলের বিভিন্ন আকরিকের মধ্যে বর্তমান অপেক্ষাকৃত কম অর্ধজীবনকাল সম্পন্ন সৃষ্ট মৌলসমূহের (Daughter Elements) তেজস্ক্রিয়তার বৃদ্ধি এবং হ্রাস সম্পর্কিত পরীক্ষা থেকে তিনটি 'প্রাকৃতিক তেজস্ক্রিয় শ্রেণী' (Naturally Radioactive Series) আবিষ্কৃত হয়েছে। এই শ্রেণীগুলির প্রত্যেকটির অন্তর্গত বিভিন্ন তেজস্ক্রিয় মৌল এক একটি অতি দীর্ঘ অর্ধজীবনকাল সম্পন্ন স্রষ্টা মৌল থেকে শুরু করে ক্রমায়াত তেজস্ক্রিয় বিঘটনের ফলে উৎপন্ন হয়। প্রত্যেকটি শ্রেণীর সর্বশেষ মৌল হচ্ছে সীসার

এক একটি স্থায়ী আইসোটোপ। এই শ্রেণীগুলির অন্তর্গত বিভিন্ন তেজস্ক্রিয় মৌলসমূহের স্বরূপ এবং এদের মধ্যেকার জন্মগত সম্পর্ক (Genetic

চিত্র 11·8
ইউরেনিয়াম-রেডিয়াম শ্রেণী।

Relationship) যাঁরা নির্ণয় করেন তাঁদের মধ্যে রাদারফোর্ড এবং তাঁর সহকর্মীবৃন্দের নাম বিশেষভাবে উল্লেখযোগ্য।

তেজস্ক্রিয় বিঘটনের ফলে বিভিন্ন মৌলের রূপান্তর (11·3) অনুচ্ছেদে

চিত্র 11·9
থোরিয়াম শ্রেণী।

আলোচিত অপসরণ সূত্র (Displacement Law) দ্বারা নির্ধারিত হয়। (11·8), (11·9) এবং (11.10) চিত্রে তিনটি প্রাকৃতিক তেজস্ক্রিয় শ্রেণী প্রদর্শিত হয়েছে। এইগুলিকে বলা হয় যথাক্রমে ইউরেনিয়াম-রেডিয়াম (বা ইউরেনিয়াম), থোরিয়াম এবং অ্যাকটিনিয়াম শ্রেণী। চিত্রগুলির অন্তর্গত বিভিন্ন মৌলের পরমাণবিক সংখ্যা ($Z$) বৃদ্ধি পায় $X$-অক্ষ অভিমুখে এবং ভর-সংখ্যা ($A$) বৃদ্ধি পায় $Y$-অক্ষ অভিমুখে। যেহেতু $\alpha$-বিঘটনের ফলে মৌলগুলির $Z$ দুই একক পরিমাণ এবং $A$ চার একক পরিমাণ হ্রাস পায়, অতএব এইরূপ বিঘটন বামদিকে নিম্নাভিমুখী এক একটি তির্যক তীরচিহ্ন দ্বারা নির্দেশিত করা হয়েছে। আবার $\beta$-বিঘটনের ফলে

চিত্র 11·10
অ্যাকটিনিয়াম শ্রেণী।

মৌলগুলির $A$ অপরিবর্তিত থাকে, কিন্তু $Z$ এক একক বৃদ্ধি পায়। সেজন্য $\beta$-বিঘটনগুলি এক একটি দক্ষিণাভিমুখী অনুভূমিক (Horizontal) তীরচিহ্ন দ্বারা নির্দেশিত করা হয়েছে।

যে কোন একটি শ্রেণীর ক্ষেত্রে, একই উল্লম্ব (Vertical) রেখার উপরে অবস্থিত মৌলগুলির পরমাণবিক সংখ্যা ($Z$) সমান; অর্থাৎ সেগুলি হচ্ছে প্রকৃতপক্ষে একই মৌলের বিভিন্ন আইসোটোপ। উদাহরণস্বরূপ (11·8) চিত্রে RaA, RaC′, RaF, (11·9) চিত্রে ThA, ThC′ এবং (11·10) চিত্রে AcA, AcC′, এদের প্রত্যেকের ক্ষেত্রে $Z=84$ হয়। অর্থাৎ এগুলি হচ্ছে পোলোনিয়াম মৌলের বিভিন্ন ভর-সংখ্যা সম্পন্ন

আইসোটোপ। আবার (11.8) চিত্রে RaB, RaD, RaG, (11.9) চিত্রে ThB, ThD এবং (11.10) চিত্রে AcB, AcD, এদের প্রত্যেকটি হচ্ছে সীসার ($Z=82$) বিভিন্ন আইসোটোপ। প্রকৃতিলব্ধ তেজস্ক্রিয় শ্রেণী সংক্রান্ত পরীক্ষা করার সময়ে ১৯১৩ সালে সডী (Soddy) সর্বপ্রথম আইসোটোপের অস্তিত্ব আবিষ্কার করেন। টমসন কর্তৃক স্থায়ী মৌলের আইসোটোপের আবিষ্কারের (2.9 অনুচ্ছেদ দ্রষ্টব্য ) পূর্বেই সডী এইভাবে তেজস্ক্রিয় মৌলের আইসোটোপ আবিষ্কার করেন।

(11.8) চিত্রে প্রদর্শিত ইউরেনিয়াম-রেডিয়াম শ্রেণী শুরু হয় $U^{238}$ আইসোটোপ থেকে। এর অর্ধজীবনকাল হচ্ছে $4.5\times10^{9}$ বৎসর। চিত্রে এটিকে UI চিহ্ন দ্বারা নির্দেশিত করা হয়েছে। $U^{238}$ আইসোটোপ $\alpha$-বিঘটনের ফলে $UX_1$ নামক মৌলে রূপান্তরিত হয়। স্পষ্টতঃ এই মৌলের $A=234$ এবং $Z=90$ হয়; অর্থাৎ এটি হচ্ছে $Th^{234}$ আইসোটোপ। প্রাথমিক যুগে এর স্বরূপ সঠিকভাবে নির্ণীত হবার আগে এটিকে UX নাম দেওয়া হয়েছিল। এই আইসোটোপটির অর্ধজীবনকাল হচ্ছে 24.1 দিন। $UX_1$ আইসোটোপ $\beta$-বিঘটনের ফলে $UX_2$ নামক মৌলে রূপান্তরিত হয়। এই মৌলটি হচ্ছে প্রকৃতপক্ষে $Pa^{234}$ ($Z=91$) আইসোটোপ। এর অর্ধজীবনকাল 1.18 মিনিট। $\beta$-বিঘটনের ফলে এটি রূপান্তরিত হয় UII নামক মৌলে, যা প্রকৃতপক্ষে ইউরেনিয়ামের $U^{234}$ ($Z=92$) আইসোটোপ। এর অর্ধজীবনকাল হচ্ছে $2.5\times10^{4}$ বৎসর। এরপর কয়েকবার ক্রমায়াত $\alpha$ এবং $\beta$ বিঘটনের পর অবশেষে স্থায়ী মৌল RaG সৃষ্ট হয়। এই মৌলটি প্রকৃতপক্ষে সীসার আইসোটোপ $Pb^{206}$ ($Z=82$)।

অনুরূপভাবে থোরিয়াম শ্রেণী শুরু হয় $Th^{232}$ ($Z=90$) আইসোটোপ থেকে। এটি $\alpha$-বিঘটন দ্বারা রূপান্তরিত হয়; এর অর্ধজীবনকাল হচ্ছে $1.39\times10^{10}$ বৎসর। এই শ্রেণী শেষ হয় ThD নামক স্থায়ী মৌলে, যা হচ্ছে প্রকৃতপক্ষে $Pb^{208}$ আইসোটোপ।

অ্যাকটিনিয়াম শ্রেণী শুরু হয় ইউরেনিয়ামের অপেক্ষাকৃত বিরল আইসোটোপ $U^{235}$ থেকে। পূর্বেই উল্লিখিত হয়েছে যে প্রাকৃতিক ইউরেনিয়ামে এই আইসোটোপটির অনুপাত 0.7% মাত্র। এটি একটি $\alpha$-বিঘটনশীল আইসোটোপ। এর অর্ধজীবনকাল হচ্ছে $7.1\times10^{8}$ বৎসর। এটিকে অনেক সময় অ্যাকটিনো-ইউরেনিয়াম নামে অভিহিত করা

## সারণী—11·1

### ইউরেনিয়াম-রেডিয়াম শ্রেণী

| তেজস্ক্রিয় মৌল | $Z$ | $A$ | প্রতীক | নিঃসৃত বিকিরণ | অর্ধজীবনকাল |
|---|---|---|---|---|---|
| ইউরেনিয়াম-I | 92 | 238 | $U^{238}$ | $\alpha, \gamma$ | $4·5 \times 10^9$ বৎসর |
| ইউরেনিয়াম-$X_1$ | 90 | 234 | $Th^{234}$ | $\beta^-, \gamma$ | 24·1 দিন |
| ইউরেনিয়াম-$X_2$ | 91 | 234 | $Pa^{234}$ | $\beta^-, \gamma$ | 1·18 মিনিট |
| ইউরেনিয়াম-Z | 91 | 234 | $Pa^{234m}$§ | $\beta^-, \gamma$ | 6·7 ঘণ্টা |
| ইউরেনিয়াম-II | 92 | 234 | $U^{234}$ | $\alpha, \gamma$ | $2·5 \times 10^5$ বৎসর |
| আয়োনিয়াম | 90 | 230 | $Th^{230}$ | $\alpha, \gamma$ | $8·0 \times 10^4$ বৎসর |
| রেডিয়াম | 88 | 226 | $Ra^{226}$ | $\alpha, \gamma$ | 1620 বৎসর |
| রেডিয়াম-এমানেশন | 86 | 222 | $Rn^{222}$ | $\alpha, \gamma$ | 3·82 দিন |
| * রেডিয়াম-A | 84 | 218 | $Po^{218}$ | $\alpha(>99\%)$, $\beta^-(0·04\%)$ | 3·05 মিনিট |
| রেডিয়াম-B | 82 | 214 | $Pb^{214}$ | $\beta^-, \gamma$ | 26·8 মিনিট |
| অ্যাস্টাটিন-218 | 85 | 218 | $At^{218}$ | $\alpha$ | 2 সেকেণ্ড |
| * রেডিয়াম-C | 83 | 214 | $Bi^{214}$ | $\beta^-(>99\%)$, $\alpha(0·04\%)$ | 19·7 মিনিট |
| রেডিয়াম-C′ | 84 | 214 | $Po^{214}$ | $\alpha$ | $1·64 \times 10^{-4}$ সেকেণ্ড |
| রেডিয়াম-C″ | 81 | 210 | $Tl^{210}$ | $\beta^-, \gamma$ | 1·32 মিনিট |
| রেডিয়াম-D | 82 | 210 | $Pb^{210}$ | $\beta^-, \gamma$ | 19·6 বৎসর |
| * রেডিয়াম-E | 83 | 210 | $Bi^{210}$ | $\alpha^-(>99\%)$, $\beta(5 \times 10^{-5}\%)$ | 5·0 দিন |
| রেডিয়াম-F | 84 | 210 | $Po^{210}$ | $\alpha, \gamma$ | 138·3 দিন |
| থ্যালিয়াম-206 | 81 | 206 | $Tl^{206}$ | $\beta^-$ | 4·2 মিনিট |
| রেডিয়াম-G | 82 | 206 | $Pb^{206}$ | — | স্থায়ী |

§ $Pa^{234m}$ বা UZ হচ্ছে $Pa^{234}(UX_2)$ আইসোটোপের একটি আইসোমার ( 17·21 অনুচ্ছেদ দ্রষ্টব্য )।

* তারকাচিহ্নিত মৌলগুলির তেজস্ক্রিয়তার $\alpha$ এবং $\beta$, দুটি শাখাই পরিলক্ষিত হয়। পঞ্চম স্তম্ভে বন্ধনীর মধ্যে বিভিন্ন শাখার শাখায়ন-অনুপাত (Branching Ratio) নির্দেশিত হয়েছে।

হয়। এই শ্রেণীর শেষ মৌল AcD হচ্ছে সীসার স্থায়ী আইসোটোপ $Pb^{207}$ $(Z=82)$।

সবগুলি শ্রেণীর মধ্যেই একটি করে $\alpha$-ক্রিয়াশীল $Z=86$ মৌলের আইসোটোপ উৎপন্ন হয়। এই মৌলটি সাধারণ উষ্ণতায় গ্যাসীয় অবস্থায় থাকে। প্রকৃতপক্ষে এটি হচ্ছে সর্বাপেক্ষা ভারী উদাসী গ্যাস (Inert Gas)। প্রাথমিক যুগে এর নানারূপ নামকরণ হয়েছিল। ইউরেনিয়াম শ্রেণীর ক্ষেত্রে এর নাম দেওয়া হয়েছিল রেডিয়াম-এমানেশন (Radium Emanation; $Em^{222}$)। থোরিয়াম ও অ্যাকটিনিয়াম শ্রেণী দুটির ক্ষেত্রে এদের বলা হত যথাক্রমে থোরিয়াম-এমানেশন (Thorium Emanation ; $Em^{220}$) এবং অ্যাকটিনিয়াম-এমানেশন (Actinium Emanation; $Em^{219}$)। পরবর্তী যুগে এই গ্যাসের

**সারণী—11·2**

থোরিয়াম শ্রেণী

| তেজস্ক্রিয় মৌল | $Z$ | $A$ | প্রতীক | নিঃসৃত বিকিরণ | অর্ধজীবনকাল |
|---|---|---|---|---|---|
| থোরিয়াম | 90 | 232 | $Th^{232}$ | $\alpha, \gamma$ | $1{\cdot}39\times10^{10}$ বৎসর |
| মেসো থোরিয়াম-I | 88 | 228 | $Ra^{228}$ | $\beta^-$ | 6·7 বৎসর |
| মেসো থোরিয়াম-II | 89 | 228 | $Ac^{228}$ | $\beta^-, \gamma$ | 6·13 ঘণ্টা |
| রেডিয়ো-থোরিয়াম | 90 | 228 | $Th^{228}$ | $\alpha, \gamma$ | 1·90 বৎসর |
| থোরিয়াম-X | 88 | 224 | $Ra^{224}$ | $\alpha, \gamma$ | 3·64 দিন |
| থোরিয়াম-এমানেশন | 86 | 220 | $Rn^{220}$ | $\alpha$ | 54·5 সেকেণ্ড |
| থোরিয়াম-A | 84 | 216 | $Po^{216}$ | $\alpha$ | 0·16 সেকেণ্ড |
| থোরিয়াম-B | 82 | 212 | $Pb^{212}$ | $\beta^-, \gamma$ | 10·6 ঘণ্টা |
| * থোরিয়াম-C | 83 | 212 | $Bi^{212}$ | $\beta^-$(66·3%), $\alpha$(33·7%) | 60·5 মিনিট |
| থোরিয়াম-C′ | 84 | 212 | $Po^{212}$ | $\alpha$ | $3{\cdot}0\times10^{-7}$ সেকেণ্ড |
| থোরিয়াম-C″ | 81 | 208 | $Tl^{208}$ | $\beta^-, \gamma$ | 3·1 মিনিট |
| থোরিয়াম-D | 82 | 208 | $Pb^{208}$ | | স্থায়ী |

### সারণী—11·3

অ্যাকটিনিয়াম শ্রেণী

| তেজস্ক্রিয় মৌল | $Z$ | $A$ | প্রতীক | নিঃসৃত বিকিরণ | অর্ধজীবনকাল |
|---|---|---|---|---|---|
| অ্যাকটিনো-ইউরেনিয়াম | 92 | 235 | $U^{235}$ | $\alpha, \gamma$ | $7{\cdot}1 \times 10^8$ বৎসর |
| ইউরেনিয়াম-Y | 90 | 231 | $Th^{231}$ | $\beta^-, \gamma$ | 25·6 ঘণ্টা |
| প্রোটো-অ্যাকটিনিয়াম | 91 | 231 | $Pa^{231}$ | $\alpha, \gamma$ | $3{\cdot}43 \times 10^4$ বৎসর |
| * অ্যাকটিনিয়াম | 89 | 227 | $Ac^{227}$ | $\beta^-(98.8\%)$, $\alpha(1.2\%)$, $\gamma$ | 22·0 বৎসর |
| রেডিয়ো-অ্যাকটিনিয়াম | 90 | 227 | $Th^{227}$ | $\alpha, \gamma$ | 18·2 দিন |
| অ্যাকটিনিয়াম-K | 87 | 223 | $Fr^{223}$ | $\beta^-, \gamma$ | 21 মিনিট |
| অ্যাকটিনিয়াম-X | 88 | 223 | $Ra^{223}$ | $\alpha, \gamma$ | 11·2 দিন |
| অ্যাকটিনিয়াম-এমানেশন | 86 | 219 | $Rn^{219}$ | $\alpha, \gamma$ | 3·92 সেকেণ্ড |
| * অ্যাকটিনিয়াম-A | 84 | 215 | $Po^{215}$ | $\alpha(>99\%)$, $\beta^-(5 \times 10^{-4}\%)$ | $1{\cdot}83 \times 10^{-3}$ সেকেণ্ড |
| অ্যাকটিনিয়াম-B | 82 | 211 | $Pb^{211}$ | $\beta^-, \gamma$ | 36·1 মিনিট |
| অ্যাসটাটিন-215 | 85 | 215 | $At^{215}$ | $\alpha$ | $10^{-4}$ সেকেণ্ড |
| * অ্যাকটিনিয়াম-C | 83 | 211 | $Bi^{211}$ | $\beta^-(0{\cdot}32\%)$ $\alpha(99.68\%)$, $\gamma$ | 2·16 মিনিট |
| অ্যাকটিনিয়াম-C′ | 84 | 211 | $Po^{211}$ | $\alpha, \gamma$ | 0·52 সেকেণ্ড |
| অ্যাকটিনিয়াম-C″ | 81 | 207 | $Tl^{207}$ | $\beta^-, \gamma$ | 4·79 মিনিট |
| অ্যাকটিনিয়াম-D | 82 | 207 | $Pb^{207}$ | — | স্থায়ী |

নাম দেওয়া হয় রেডন (Radon; Rn)। নীয়ন, আর্গন, ক্রুপটন প্রভৃতি উদাসী গ্যাসের সংগে এই মৌলটি রাসায়নিক দিক থেকে সমতুল্য। সাধারণ উষ্ণতায় গ্যাসীয় অবস্থায় থাকার দরুন প্রথমিক যুগের বিজ্ঞানীগণকে এই মৌলটিকে নিয়ে বেশ অসুবিধায় পড়তে হত। তেজস্ক্রিয় শ্রেণীর বিভিন্ন মৌলগুলিকে রাসায়নিক পদ্ধতিতে পৃথক করার সময় এই তেজস্ক্রিয় গ্যাস নির্গত হয়ে পরীক্ষাগারের মধ্যে বিভিন্ন স্থানে ছড়িয়ে পড়ত। এদের অর্ধজীবনকাল অপেক্ষাকৃত স্বল্প হওয়ার দরুন এরা খুব তাড়াতাড়ি রূপান্তরিত হত। এদের থেকে α-বিঘটনের ফলে সৃষ্ট তেজস্ক্রিয় পরিন্যাসগুলি (Active Deposits) পরীক্ষাগারের টেবিল, দেওয়াল, যন্ত্রপাতি প্রভৃতি

সব কিছুর উপর প্রক্ষিপ্ত হয়ে যেত এবং এই সব স্থান থেকে তেজস্ক্রিয় বিকিরণ নিঃসৃত হতে দেখা যেত। বিজ্ঞানীরা এই রহস্যময় ঘটনাবলীর কারণ সঠিক বুঝতে না পেরে খুব অসুবিধায় পড়তেন। পরে রাদারফোর্ড বুঝতে পারেন যে এইরূপ ঘটবার মূলে হচ্ছে বিভিন্ন শ্রেণীর অন্তর্গত রেডিয়াম আইসোটোপ থেকে সৃষ্ট উপরোক্ত তেজস্ক্রিয় গ্যাসগুলির নির্গমন। রাদারফোর্ড এবং সডী এই গ্যাসকে $-150^\circ$সে উষ্ণতায় তরলীভূত করে এর গ্যাসীয় প্রকৃতি সংশয়াতীত ভাবে প্রমাণ করেন। সাধারণতঃ কাঁচনলের মধ্য দিয়ে বায়ুপ্রবাহ পাঠিয়ে এগুলিকে স্রষ্টা মৌল থেকে পৃথক করা হয়।

11·1, 11·2 এবং 11·3 সারণীতে উপরোল্লিখিত তেজস্ক্রিয় শ্রেণী তিনটির অন্তর্গত বিভিন্ন মৌলের তেজস্ক্রিয় ধর্মসমূহ লিপিবদ্ধ করা হয়েছে।

বেশীর ভাগ তেজস্ক্রিয় মৌলই হয় $\alpha$-বিঘটন অথবা $\beta$-বিঘটনের ফলে রূপান্তরিত হয়। কয়েকটি মৌলের ক্ষেত্রে এর ব্যতিক্রম দেখা যায়। এদের তেজস্ক্রিয়তার দুটি শাখা (Branches) দেখা যায়, $\alpha$-শাখা এবং $\beta$- শাখা। অর্থাৎ এদের পরমাণুগুলির একটা নির্দিষ্ট অনুপাত $\alpha$-বিঘটনের ফলে রূপান্তরিত হয়; বাকীগুলি $\beta$-বিঘটনের দ্বারা রূপান্তরিত হয়। এই অনুপাতগুলিকে বলা হয় শাখায়ন-অনুপাত (Branching Ratio)। উপরোল্লিখিত প্রত্যেকটি শ্রেণীতেই C-চিহ্ন দ্বারা নির্দেশিত মৌলের ক্ষেত্রে (RaC, ThC এবং AcC) এইরূপ তেজস্ক্রিয়তার শাখা দেখা যায়। উদাহরণস্বরূপ ইউরেনিয়াম-রেডিয়াম শ্রেণীতে RaC বা $Bi^{214}$ $(Z=83)$ মৌলের পরমাণুগুলি 99% অপেক্ষাও বেশী ক্ষেত্রে $\beta$-বিঘটনের দ্বারা RaC′ বা $Po^{214}$ $(Z=84)$ মৌলে রূপান্তরিত হয়। অপরপক্ষে 0·04% ক্ষেত্রে এগুলি $\alpha$-বিঘটনের দ্বারা RaC″ বা $Tl^{210}$ $(Z=81)$ মৌলে রূপান্তরিত হয়। অনুরূপে ThC ($Bi^{212}$) 66·3% ক্ষেত্রে $\beta$-বিঘটনের দ্বারা ThC′ ($Po^{212}$) মৌলে এবং 33·7% ক্ষেত্রে $\alpha$-বিঘটনের দ্বারা ThC″ ($Tl^{208}$) মৌলে রূপান্তরিত হয়।

## 11.3 : তেজস্ক্রিয়তার একক

বিভিন্ন মৌলের তেজস্ক্রিয়তা পরিমাপ করা হয় প্রতি সেকেণ্ডে বিঘটিত পরমাণুর সংখ্যা পরিমাপ করে। সাধারণতঃ 226 ভর-সংখ্যা সম্পন্ন এক গ্রাম রেডিয়াম আইসোটোপের ($Ra^{226}$) মধ্যে যতগুলি পরমাণু এক

সেকেণ্ডে α-বিঘটনের ফলে রূপান্তরিত হয় সেই সংখ্যাকে তেজস্ক্রিয়তার একক হিসাবে গণ্য করা হয়। এই এককের নাম দেওয়া হয়েছে 'কুরী' (Curie)। এই সংখ্যাটি খুব যত্ন সহকারে পরিমাপ করা হয়েছে। কিন্তু বিভিন্ন পরিমাপের মধ্যে সব সময় সংগতি পাওয়া যায় না। সেজন্য আন্তর্জাতিক চুক্তির দ্বারা কুরীর একটি সর্বজন গ্রাহ্য মান ঠিক করা হয়েছে ঃ

$$1 \text{ কুরী} = 3.70 \times 10^{10} \quad \text{বিঘটন/সেকেণ্ডে}$$

যদি কোন তেজস্ক্রিয় মৌলের ক্ষেত্রে প্রতি সেকেণ্ডে বিঘটিত পরমাণুর সংখ্যা উপরে প্রদত্ত সংখ্যার সমান হয়, তাহলে বলা হয় যে উক্ত মৌলের তেজস্ক্রিয়তার মান হচ্ছে এক কুরী।

এক কুরীর এক সহস্র ভাগের এক ভাগ এবং দশ লক্ষ ভাগের এক ভাগ পরিমাণ তেজস্ক্রিয়তাকে বলা হয় যথাক্রমে এক মিলিকুরী (Millicurie) এবং এক মাইক্রোকুরী (Microcurie)। এই দুটি সংখ্যার মান হচ্ছে যথাক্রমে $3.70 \times 10^7$ বিঘটন/সেকেণ্ডে এবং $3.70 \times 10^4$ বিঘটন/সেকেণ্ডে।

উদাহরণস্বরূপ এক কুরী তেজস্ক্রিয়তা সম্পন্ন $Rn^{222}$ এবং $U^{238}$ আইসোটোপ দুটির পরিমাণ নির্ণয় করা যেতে পারে ঃ

স্পষ্টতঃ $Rn^{222}$ আইসোটোপের ক্ষেত্রে আমরা লিখিতে পারি

$$\lambda_{Rn} N_{Rn} = 1 \quad \text{কুরী} = 3.70 \times 10^{10} \quad \text{বিঘটন/সেকেণ্ডে}$$

এখানে $\lambda_{Rn} = 0.693/\tau_{Rn}$ হচ্ছে $Rn^{222}$ আইসোটোপের বিঘটন-ধ্রুবক এবং $\tau_{Rn}$ হচ্ছে এর অর্ধজীবনকাল। $N_{Rn}$ হচ্ছে $Rn^{222}$ পরমাণুর মোট সংখ্যা। যেহেতু $\tau_{Rn} = 3.82$ দিন, অতএব

$$N_{Rn} = \frac{3.70 \times 10^{10}}{0.693} \times 3.82 \times 24 \times 3600 = 1.762 \times 10^{16}$$

সুতরাং $Rn^{222}$ আইসোটোপের পরিমাণ হচ্ছে

$$m_{Rn} = \frac{1.762 \times 10^{16} \times 222}{6.025 \times 10^{23}} = 6.49 \text{ মাইক্রোগ্রাম}$$

প্রমাণ উষ্ণতায় এবং চাপে এই পরিমাণ $Rn^{222}$ গ্যাসের আয়তন হয়

$$v_{Rn}=\frac{6{\cdot}49\times10^{-6}\times22417}{222}=6{\cdot}56\times10^{-4} \text{ ঘন সেমি}$$

অনুরূপে $U^{238}$ আইসোটোপের ক্ষেত্রে পাওয়া যায়

$$N_U=\frac{3{\cdot}70\times10^{10}}{\lambda_U}=\frac{3{\cdot}70\times10^{10}}{0{\cdot}693}$$

$$\times4{\cdot}5\times10^{10}\times365\times24\times3600=7{\cdot}336\times10^{27}.$$

সুতরাং $U^{238}$ আইসোটোপের পরিমাণ হয়

$$m_U=\frac{7{\cdot}336\times10^{27}\times238}{6{\cdot}025\times10^{23}}=2900 \text{ কিলোগ্রাম}$$

## 11. 9 : তেজস্ক্রিয় পদার্থের গড় জীবনকাল

তেজস্ক্রিয় পদার্থসমূহের পরমাণুগুলির বিঘটন সম্পূর্ণ যদৃচ্ছভাবে (At Random) হতে থাকে। কোন তেজস্ক্রিয় পদার্থের কোন পরমাণু কখন বিঘটিত হবে তা বলা সম্ভব নয়। কোন একটি বিশেষ পরমাণুর উপরে দৃষ্টি নিবদ্ধ রাখলে সেটি নিরীক্ষণকালের মধ্যে যে কোন মুহূর্তে বিঘটিত হতে পারে ; অথবা দীর্ঘ সময় পরেও বিঘটিত হতে পারে। এই উক্তি প্রত্যেকটি পরমাণুর ক্ষেত্রে সমভাবে প্রযোজ্য। অবশ্য সামগ্রিক ভাবে দেখলে নির্দিষ্ট মৌলের পরমাণুগুলির বিঘটন মোটামুটি ভাবে একটা নির্দিষ্ট হারে ঘটতে থাকে ( সমীকরণ 11·3 দ্রষ্টব্য )। এই হার মৌলটির বিঘটন ধ্রুবকের উপর নির্ভর করে।

যদিও পরমাণু বিঘটন যদৃচ্ছভাবে হতে থাকে, তথাপি নির্দিষ্ট সময় সীমার মধ্যে একটি পরমাণুর বিঘটিত হবার সম্ভাব্যতা (Probability) নির্ণয় করা যায়। এই সম্ভাব্যতা অন্যান্য পরমাণুর বিঘটনের উপর অথবা মৌলটির রাসায়নিক বা ভৌত অবস্থার উপর নির্ভর করে না। নির্দিষ্ট মৌলের মধ্যে সকল পরমাণুর ক্ষেত্রেই এই সম্ভাব্যতার মান সমান।

মনে করা যাক যে $t$ সময় পর্যন্ত কোন একটি পরমাণু বিঘটিত না হবার সম্ভাব্যতা হচ্ছে $P(t)$। উক্ত সময় থেকে শুরু করে আরও $dt$ সময়ের মধ্যে পরমাণুটির বিঘটিত হবার সম্ভাব্যতা নির্ভর করে $dt$ সময়-সীমার মানের উপর।

মনে করা যাক যে পরমাণুগুলির গড় জীবনকাল হচ্ছে $T$ এবং $dt \ll T$ হয়। স্পষ্টতঃ গড় হিসাবে $T$ সময়ের মধ্যে যে কোন পরমাণু অবশ্যই বিঘটিত হবে এবং বিঘটন সম্ভাব্যতা হবে একের সমান। সুতরাং $dt$ সময়ের মধ্যে পরমাণুটির বিঘটনের সম্ভাব্যতা $dt/T$ হবে। অতএব $t$ থেকে $t+dt$ সময়-সীমার মধ্যে পরমাণুটির বিঘটিত না হবার সম্ভাব্যতা $1-dt/T$ হবে। সুতরাং $(t+dt)$ সময় পর্যন্ত পরমাণুটি বিঘটিত না হবার সম্ভাব্যতা হবে $P(t)$ এবং $1-dt/T$ এই দুটি সম্ভাব্যতার গুণফলের সমান। যেহেতু এই সম্ভাব্যতাকে $P(t+dt)$ লেখা যায়, অতএব আমরা পাই

$$P(t+dt)=P(t)(1-dt/T)$$

যেহেতু $dt$ সংখ্যাটিকে অতি ক্ষুদ্র সময়-সীমা হিসাবে ধরা হয়েছে, অতএব উপরের সমীকরণের বাম দিকে $P(t+dt)$ অপেক্ষকটিকে (Function) টেয়্‌লর শ্রেণী অনুযায়ী প্রসারিত (Taylor Series Expansion) করলে পাওয়া যায়

$$P(t)+\left(\frac{dP}{dt}\right)_t dt=P(t)-P(t)\frac{dt}{T}$$

উপরের প্রসারণে $dt$ সংখ্যাটির দ্বিঘাত বা উচ্চতর ঘাত (Power) সম্পন্ন পদগুলিকে উপেক্ষা করা হয়েছে। উক্ত সমীকরণ থেকে পাওয়া যায়

$$\frac{dP}{P}=-\frac{dt}{T}$$

এই সমীকরণকে সমাকলন করে পাওয়া যায়

$$P(t)=Ae^{-t/T}$$

$A$ হচ্ছে সমাকলন-ধ্রুবক। যেহেতু $t=0$ সময়ে পরমাণুটি নিশ্চয়ই বিঘটিত হয়নি, সুতরাং $t=0$ সময়ে এর বিঘটিত না হবার সম্ভাব্যতা $P(t)=P(0)=1$ হয়। সুতরাং উপরের সমীকরণ থেকে $A=1$ পাওয়া যায়। অতএব আমরা পাই

$$P(t)=e^{-t/T} \qquad (11{\cdot}16)$$

আবার (11·4) সমীকরণ অনুযায়ী যেহেতু $N_0$ প্রাথমিক সংখ্যক পরমাণুর মধ্যে $t$ সময় পর্যন্ত $N$ সংখ্যক পরমাণু বিঘটিত হয়নি, অতএব উক্ত সময়ের মধ্যে একটি পরমাণুর বিঘটিত না হবার সম্ভাব্যতা হচ্ছে

$$P(t) = N/N_0 = e^{-\lambda t}$$

এই সমীকরণকে (11·16) সমীকরণের সংগে তুলনা করলে আমরা পাই

$$T = 1/\lambda \qquad (11{\cdot}17)$$

গড় জীবনকাল $T$ এবং $\lambda$ বিঘটন-ধ্রুবকের মধ্যে উপরে প্রদত্ত গাণিতিক সম্পর্ক নিম্নলিখিত উপায়েও প্রতিপাদন করা যায়।

সমীকরণ (11·3) অনুযায়ী $t$ থেকে $t+dt$ সময়ের মধ্যে বিঘটিত পরমাণুর সংখ্যা হচ্ছে

$$dN = -\lambda N dt = -\lambda N_0 e^{-\lambda t} dt$$

যেহেতু $dt \ll t$, অতএব এই পরমাণুগুলির জীবনকাল $t$ ধরা যেতে পারে। সুতরাং সব পরমাণুর গড় জীবনকাল হবে

$$T = \frac{\int t dN}{\int dN} = \frac{-\lambda \int_0^\infty N_0 e^{-\lambda t} t dt}{-\lambda \int_0^\infty N_0 e^{-\lambda t} dt} = \frac{1}{\lambda}$$

এখানে উল্লেখযোগ্য যে যেহেতু পরমাণুগুলির বিঘটন কাল প্রকৃতপক্ষে শূন্য থেকে অসীম সময় পর্যন্ত ব্যাপ্ত হয়, অতএব এদের 'গড় জীবন-কাল' কথাটির বাস্তব ক্ষেত্রে বিশেষ কোন তাৎপর্য নাই। বিঘটন-ধ্রুবক ($\lambda$) এবং অর্ধজীবনকাল ($\tau$), তেজস্ক্রিয় বিঘটনের সংগে সংশ্লিষ্ট এই দুটি সংখ্যাই বাস্তব ক্ষেত্রে অনেক বেশী তাৎপর্যপূর্ণ।

## 11. 10 : পৃথিবীর বয়স

ইউরেনিয়াম, থোরিয়াম প্রভৃতি অতি দীর্ঘ জীবন সম্পন্ন মৌলের আকরিক নিয়ে পরীক্ষা অনুষ্ঠিত করে এই সমস্ত আকরিক বিশ্বজগৎ সৃষ্টির আদি যুগে কোন সময়ে, অর্থাৎ বর্তমান কাল থেকে কতদিন পূর্বে ঘনীভূত (Solidify) হয়েছিল তা নির্ণয় করা সম্ভব। স্পষ্টতঃ বিশ্বজগৎ সৃষ্টির আদিতে যখন মৌলসমূহের সৃষ্টি হয় তখন থেকে আরম্ভ করে বর্তমান কাল পর্যন্ত যে দীর্ঘ সময় অতিবাহিত হয়েছে তার তুলনায়

এইসব মৌলের অর্ধজীবনকাল খুব কম হতে পারে না। কারণ তাহলে এই সব মৌলের অস্তিত্বের কোন চিহ্নই বর্তমানে পৃথিবীর বুকে বা বিশ্বজগতের কোন স্থানে পাওয়া যেত না। বস্তুতঃ ভূতত্ত্ববিদ্‌গণ (Geologists) নানারূপ পরীক্ষার ফলে সিদ্ধান্ত করেছেন যে পৃথিবীর বয়স প্রায় পাঁচশ কোটি ($5 \times 10^9$) বৎসরের কাছাকাছি। তাঁদের অনুমিত পৃথিবীর বয়ঃক্রমের সংগে ইউরেনিয়াম বা থোরিয়ামের (11·7) অনুচ্ছেদে প্রদত্ত অর্ধজীবনকালের মধ্যে ভাল সংগতি লক্ষ্য করা যায়।

উপরোক্ত মৌলগুলির তেজস্ক্রিয়তা ধর্ম ব্যবহার করে তাদের বিভিন্ন প্রকার আকরিকের উৎপত্তি কাল নির্ণয় করার জন্য নানাবিধ পরীক্ষা পদ্ধতি উদ্ভব করা হয়েছে। বর্তমান অনুচ্ছেদে আমরা সংক্ষেপে এদের মধ্যে একটি পদ্ধতি সম্বন্ধে আলোচনা করব।

(11·7) অনুচ্ছেদে দেখা গেছে যে বিভিন্ন প্রকৃতিক তেজস্ক্রিয় শ্রেণীর শুরু হয় এক একটি দীর্ঘ অর্ধজীবনকাল সম্পন্ন মৌল ( যথা $U^{238}$, $Th^{232}$ বা $U^{235}$ ) থেকে, আর শেষ হয় এক একটি স্থায়ী (Stable) সীসার আইসোটোপে ( যথা $Pb^{206}$, $Pb^{208}$ বা $Pb^{207}$ ) গিয়ে। যদি ইউরেনিয়াম শ্রেণীর কথা বিবেচনা করা যায়, তাহলে প্রত্যেকটি $U^{238}$ পরমাণুর ক্রমায়াত (Successive) বিঘটনের ফলে পরিশেষে একটি করে $Pb^{206}$ পরমাণুর সৃষ্টি হয়। ইউরেনিয়ামের কোন আকরিক ঘনীভূত হবার পর থেকে বর্তমান কাল পর্যন্ত অতিবাহিত সময় যদি $t$ হয় এবং যদি এই আকরিকের একটা নির্দিষ্ট পরিমাণের মধ্যে আদিতে $N_{U_0}$ সংখ্যক ইউরেনিয়াম পরমাণু ছিল বলে ধরা হয়, তাহলে উক্ত আকরিকের মধ্যে বর্তমানে যতগুলি $U^{238}$ পরমাণু উপস্থিত থাকবে তার সংখ্যা হচ্ছে

$$N_U = N_{U_0}\, e^{-\lambda_u t}$$

সুতরাং আকরিকটি ঘনীভূত হবার পর থেকে বর্তমান কাল পর্যন্ত বিঘটিত $U^{238}$ পরমাণুর সংখ্যা $(N_{U_0} - N_U)$ হবে। স্পষ্টতঃ এই সংখ্যা বর্তমানে আকরিকের মধ্যে উপস্থিত $Pb^{206}$ পরমাণু সংখ্যার সমান হবে। অর্থাৎ

$$N_{Pb} = N_{U_0} - N_U = N_U(e^{\lambda_u t} - 1)$$

উপরের সমীকরণ থেকে ঘনীভূত আকরিকের বয়স পাওয়া যায়

$$t = \frac{1}{\lambda_U} \ln \frac{N_{Pb} + N_U}{N_U} \qquad (11{\cdot}18)$$

রাসায়নিক এবং ভরবর্ণালী বিশ্লেষণ পদ্ধতিতে $N_{Pb}$ এবং $N_U$ নির্ণয় করে $t$ পরিমাপ করা যায়। এই পদ্ধতিতে আকরিকের বয়ঃক্রম নির্ণয় করার সময় অনুমান করা হয় যে ঘনীভূত আকরিকের মধ্যে $U^{238}$ থেকে উৎপন্ন $Pb^{206}$ আইসোটোপ ছাড়া অতিরিক্ত কোন সীসার অস্তিত্ব থাকতে পারে না। তাছাড়া আরও অনুমান করা হয় যে তেজস্ক্রিয় বিঘটনের ফলে উৎপন্ন সীসার সমস্তটাই আকরিকের মধ্যে থেকে গেছে, কোন কারণে একটুও নষ্ট হয়নি বা আকরিক থেকে নির্গত হয়ে

সারণী—11·4

| আইসোটোপ | তেজস্ক্রিয়তার প্রকৃতি | অর্ধজীবনকাল (বৎসর) |
|---|---|---|
| ${}_{9}K^{40}$ | E.C., $\beta^+, \beta^-$ | $1{\cdot}3 \times 10^9$ |
| ${}_{3}V^{50}$ | E.C. | $4 \times 10^{14}$ |
| ${}_{37}Rb^{8}$ | $\beta^-$ | $6 \times 10^{10}$ |
| ${}_{9}In^{11}$ | $\beta^-$ | $6 \times 10^{13}$ |
| ${}_{7}La^{1}$ | E.C., $\beta^-$ | $10^{11}$ |
| ${}_{58}Ce^{1}$ | $\alpha$ | $5 \times 10^{15}$ |
| ${}_{0}Nd^{1}$ | $\alpha$ | $5 \times 10^{15}$ |
| ${}_{2}Sm^{1}$ | $\alpha$ | $1{\cdot}3 \times 10^{11}$ |
| ${}_{71}Lu^{176}$ | E.C., $\beta^-$ | $2{\cdot}4 \times 10^{10}$ |
| ${}_{75}Re^{1}$ | $\beta^-$ | $5 \times 10^{10}$ |
| ${}_{78}Pt^{192}$ | $\alpha$ | $10^{15}$ |
| ${}_{83}Bi^{209}$ | $\alpha$ | $2 \times 10^{18}$ |

যায় নি। এই অনুমানগুলি মোটামুটি ভাবে যুক্তিসংগত বলে মনে করা যায়। তেজস্ক্রিয় আকরিকের বয়স নির্ণয়ের জন্য উপরে আলোচিত ‘সীসা-পদ্ধতি’ ছাড়া আর এক প্রকার পরীক্ষা পদ্ধতি উদ্ভাবিত হয়েছে,

যাকে বলা হয় 'হিলিয়াম পদ্ধতি'। ইউরেনিয়াম প্রভৃতি মৌল থেকে নিঃসৃত $\alpha$-কণিকাগুলি হিলিয়াম গ্যাস হিসাবে তেজস্ক্রিয় আকরিকের মধ্যে সঞ্চিত হয়। দীর্ঘ কাল ধরে বিঘটনের ফলে যথেষ্ট পরিমাণ হিলিয়াম গ্যাস সৃষ্ট হয়। নির্দিষ্ট পরিমাণ আকরিকের মধ্যে এইভাবে সঞ্চিত হিলিয়াম গ্যাসের আয়তন পরিমাপ করে উক্ত আকরিকের বয়স নির্ণয় করা যায়।

ইউরেনিয়াম এবং থোরিয়াম ছাড়া আরও কয়েকটি অতি দীর্ঘ জীবন সম্পন্ন প্রাকৃতিক মৌলের অস্তিত্বের কথা জানা গেছে। (11·4) সারণীতে এদের একটি তালিকা লিপিবদ্ধ করা হয়েছে। এদের মধ্যে কোন কোন আইসোটোপের ( যথা $K^{40}$ ) তেজস্ক্রিয়তা ধর্ম ব্যবহার করে তাদের বিভিন্ন উৎস-আকরিকের বয়স নির্ণয় করা হয়েছে।

এদের মধ্যে অনেকগুলি আইসোটোপের সুদীর্ঘ জীবনকালের জন্য এদের তেজস্ক্রিয়তা এত ক্ষীণ হয় যে তার আভাস পাওয়াও খুব শক্ত হয়। বস্তুতঃ U, Th বা Ac শ্রেণী বহির্ভূত অতি দীর্ঘ জীবনকাল সম্পন্ন আরও অন্যান্য তেজস্ক্রিয় আইসোটোপ ভবিষ্যতে আবিষ্কৃত হতে পারে। এছাড়া অপেক্ষাকৃত অনেক কম অর্ধজীবনকাল সম্পন্ন আর এক জাতীয় প্রকৃতিলব্ধ তেজস্ক্রিয় আইসোটোপের কথা জানা আছে, যথা $H^3(\tau = 12{\cdot}4$ বৎসর ), $C^{14}$ ($\tau = 5568$ বৎসর), ইত্যাদি। এগুলি কিন্তু (11·4) সারণীতে লিপিবদ্ধ তেজস্ক্রিয় মৌলগুলির সমগোত্রীয় নয়। এই শেষোক্ত মৌলগুলি তাদের সুদীর্ঘ জীবনকালের জন্য বিশ্বসৃষ্টির আদিযুগ থেকেই প্রকৃতিতে বর্তমান আছে। অপরপক্ষে $H^3$, $C^{14}$ প্রভৃতি মহাজাগতিক রশ্মির মধ্যে বর্তমান বিভিন্ন প্রকার কণিকার সংঘাতে বিভিন্ন স্থায়ী মৌলের কেন্দ্রকীয় রূপান্তরের ফলে ক্রমাগত উৎপন্ন হতে থাকে।

### 11. 11 : অর্ধজীবনকালের পরিমাপ

সাধারণতঃ সময়ের সঙ্গে তেজস্ক্রিয় মৌল থেকে নির্গত $\alpha$, $\beta$ বা অন্যরূপ বিকিরণের তীব্রতার হ্রাস পরিমাপ করে (11·6) সমীকরণের সাহায্যে তেজস্ক্রিয় মৌলের অর্ধজীবনকাল পরিমাপ করা হয়। এইসব বিকিরণের নির্দেশক (Detector) এবং পরিমাপক যন্ত্রাবলী সম্বন্ধে পঞ্চদশ পরিচ্ছেদে আলোচনা করা হবে। এখানে উল্লেখযোগ্য যে অর্ধজীবন-কাল খুব দীর্ঘ হলে পরীক্ষাকালের মধ্যে, এমন কী কয়েক বৎসরের মধ্যেও নিঃসৃত বিকিরণের তীব্রতার কোন হ্রাস পরিলক্ষিত হয় না। এই

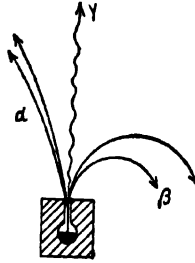
সব ক্ষেত্রে অন্য উপায় অবলম্বন করতে হয়। পরীক্ষাধীন তেজস্ক্রিয় পদার্থের পরিমাণ সহজেই সঠিক ভাবে নির্ণয় করা যায়। তাছাড়া প্রতি সেকেণ্ডে উক্ত পদার্থ থেকে নিঃসৃত $\alpha$ বা $\beta$ কণিকার সংখ্যাও সঠিকভাবে নিরূপণ করা যায়। এর থেকে পরমাণু সংখ্যা $N$ এবং বিঘটন হার $\frac{dN}{dt}$ প্রতিপন্ন করা যায়। তারপর সমীকরণ (11·3) থেকে বিঘটন-ধ্রুবক ($\lambda$) এবং তার থেকে অর্ধজীবনকাল ($\tau$) নির্ণয় করা যায়।

খুব নিম্ন অর্ধজীবনকাল সম্পন্ন তেজস্ক্রিয় পদার্থের ক্ষেত্রে বর্তমানে বিশেষভাবে উদ্ভাবিত ইলেকট্রনিক পদ্ধতিতে অর্ধজীবনকাল নির্ণয় করা হয়। এ সম্বন্ধে (20·5) অনুচ্ছেদে আলোচনা করা হবে।

## পরিচ্ছেদ 12

# আলফা-রশ্মির ধর্মাবলী ; আলফা-রশ্মি বিক্ষেপ

### 12.1 : সূচনা

প্রকৃতিক তেজস্ক্রিয় পদার্থসমূহ থেকে তিন প্রকার বিকিরণ নিঃসৃত হয়। এদের বলা হয় $\alpha$, $\beta$ এবং $\gamma$ বিকিরণ। এদের স্বরূপ সম্বন্ধে (11·3) অনুচ্ছেদে সংক্ষেপে আলোচনা করা হয়েছে। প্রাথমিক যুগে $\alpha$, $\beta$ এবং $\gamma$ বিকিরণের পার্থক্য প্রধানতঃ বিভিন্ন পদার্থের মধ্যে এদের ভেদ্যতার পার্থক্য থেকে বোঝা যায় ( 11·2 অনুচ্ছেদ দ্রষ্টব্য )। তাছাড়া

চৌম্বক ক্ষেত্রে $\alpha$, $\beta$ ও $\gamma$ রশ্মির ভ্রমণপথ।

চিত্র 12·1

চৌম্বক ক্ষেত্রে বিকিরণগুলির বিচ্যুতি লক্ষ করেও এদের পার্থক্য বোঝা যায়। চৌম্বক ক্ষেত্রে $\alpha$ বিকিরণ অল্প পরিমাণে বিচ্যুত হয় ; $\beta$-বিকিরণ বিপরীত দিকে অনেক বেশী পরিমাণে বিচ্যুত হয়। $\gamma$-বিকিরণের কোনরূপ বিচ্যুতি ঘটে না। তিন প্রকার বিকিরণের উপর চৌম্বক ক্ষেত্রের উপরোক্ত ক্রিয়া (12·1) চিত্রে প্রদর্শিত হয়েছে। স্পষ্টতঃ চৌম্বক ক্ষেত্রের ক্রিয়া থেকে প্রতীয়মান হয় যে $\alpha$ এবং $\beta$ বিকিরণ বিপরীত আধানবাহী দুই প্রকার কণিকা। অপরপক্ষে $\gamma$-বিকিরণের কোন আধান নাই। $\beta$-বিকিরণের তুলনায় $\alpha$-বিকিরণের অনেক কম পরিমাণ বিচ্যুতি থেকে প্রতীয়মান যে $\alpha$-কণিকাগুলি $\beta$-কণিকা অপেক্ষা অনেক বেশী ভারী। বস্তুতঃ এই কণিকাগুলি দুই ইলেকট্রনীয় ধনাত্মক আধানবাহী হিলিয়াম পরমাণুর আয়ন থেকে অভিন্ন। পরবর্তী যুগে এগুলি হিলিয়াম কেন্দ্রক

বলে প্রমাণিত হয়। এদের পরমাণবিক সংখ্যা $Z=2$ এবং ভর-সংখ্যা $A=4$; সুতরাং এদের $He^4$ এই চিহ্ন দ্বারা নির্দেশিত করা যায়।

**12. 2 : $\alpha$-কণিকার $\varepsilon/M$ নির্ণয়**

রাদারফোর্ড এবং রবিনসন (Rutherford and Robinson) নিম্নে বর্ণিত পরীক্ষার সাহায্যে $\alpha$-কণিকাগুলির আপেক্ষিক আধান ($\varepsilon/M$) নির্ণয় করেন। $\alpha$-কণিকার উৎস হিসাবে একটি পাতলা কাঁচের তৈয়ারী আবদ্ধ নলের মধ্যে অল্প পরিমাণ রেডন গ্যাস ব্যবহার করা হয়। এই ব্যবস্থায় $Rn^{222}$ আইসোটোপ এবং তার বিঘটনের ফলে সৃষ্ট মৌল-সমূহ থেকে নিঃসৃত $\alpha$-কণিকা নিয়ে পরীক্ষা করা যায়। S উৎস থেকে নিঃসৃত $\alpha$-কণিকাগুলি রশ্মিগুচ্ছের আকারে $G_1$ $G_2$ দুটি সমান্তরাল সমতল রূপার দ্বারা প্রলিপ্ত কাঁচের প্লেটের মধ্যবর্তী অঞ্চলে প্রবেশ করে

$\alpha$-কণিকার $\varepsilon/M$ নির্ণয়ের জন্য রাদারফোর্ড ও রবিনসনের পরীক্ষা ব্যবস্থা।

চিত্র 12·2

(12·2 চিত্র দ্রষ্টব্য)। প্লেট দুটির মধ্যে ইচ্ছামত বিভব প্রভেদ প্রয়োগ করা যায়। প্লেট দুটির অপর প্রান্তে একটি রেখাছিদ্র (Slit) A থাকে এবং এর 50 সেমি পিছনে একটি অ্যালুমিনিয়ামের পাত দ্বারা বেষ্টিত ফোটোগ্রাফিক প্লেট P স্থাপিত থাকে। সমগ্র যন্ত্রটি খুব নিম্ন বায়ুচাপে রাখা আধারের মধ্যে অবস্থিত থাকে।

যদি $G_1$ এবং $G_2$ প্লেট দুটির মধ্যে কোন বিভব প্রভেদ প্রয়োগ না করা হয়, তাহলে $\alpha$-রশ্মিগুচ্ছ অবিচ্যুত অবস্থায় A রেখাছিদ্র পার হয়ে P ফোটোগ্রাফিক প্লেটের মধ্যস্থলে আপতিত হয়ে একটি কৃষ্ণরেখা উৎপন্ন করে।

এখন $G_1$ এবং $G_2$ প্লেটদ্বয়ের মধ্যে বিভব প্রভেদ প্রয়োগ করলে এদের সমান্তরালে আগত $\alpha$-রশ্মিগুচ্ছ প্রযুক্ত তড়িৎক্ষেত্রের প্রভাবে উপরের বা নীচের দিকে বিচ্যুত হয়ে যায়। প্লেট দুটির মধ্যেকার ব্যবধান খুব কম থাকার জন্য বিচ্যুত $\alpha$-কণিকাগুলি $G_1$ বা $G_2$ কোন একটি প্লেটের উপর

আপতিত হয়। সেজন্য সেগুলি প্লেট দুটির অন্তর্বর্তী স্থান থেকে নির্গত হতে পারে না। প্লেট দুটির তলের সংগে সামান্য তির্যক ভাবে আগত রশ্মিগুচ্ছ কিন্তু তড়িৎক্ষেত্রের প্রভাবে অধিবৃত্তাকার (Parabolic) পথে অগ্রসর হয়ে এদের অন্তর্বর্তী অঞ্চল থেকে নির্গত হয়ে A রেখাছিদ্র পার হতে পারে। এরপর $\alpha$-কণিকাগুলি সরলরেখা পথ ধরে অগ্রসর হয়ে P ফোটোগ্রাফিক প্লেটের উপর আপতিত হয় এবং তার ফলে উক্ত প্লেটের উপর পূর্ববর্ণিত কৃষ্ণরেখার উপরে বা নীচে $d$ দূরত্বে আর একটি কৃষ্ণরেখার সৃষ্টি হয়। তড়িৎক্ষেত্রের দিক পরিবর্তন করে বিপরীত দিকে অনুরূপ আর একটি কৃষ্ণরেখা উৎপন্ন করা হয়।

$X$ তড়িৎক্ষেত্রের প্রভাবে $\varepsilon$ আধান এবং $M$ ভর সম্পন্ন $\alpha$-কণিকার উপর প্রযুক্ত বল হয় $X\varepsilon$ এবং তার ফলে উক্ত ক্ষেত্রের দিকে এর ত্বরণ হয়

$$f=\frac{X\varepsilon}{M}$$

যদি $G_1$, $G_2$ প্লেট দুটির দৈর্ঘ্য $l$ এবং $\alpha$-কণিকাগুলির প্রাথমিক বেগ $v$ হয়, তাহলে (12·2) চিত্রে প্রদর্শিত $\alpha$-কণিকার ভ্রমণপথের শীর্ষবিন্দু (Vertex) থেকে রেখাছিদ্র A পর্যন্ত পরিভ্রমণের জন্য প্রয়োজনীয় সময় হয়

$$t=\frac{l/2}{v}=l/2v$$

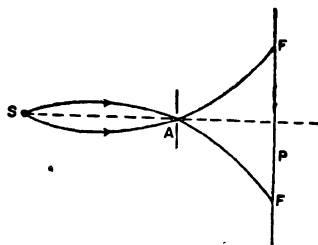
সুতরাং A রেখাছিদ্র থেকে নির্গমন কালে তড়িৎক্ষেত্রের অভিমুখে $\alpha$-কণিকা-গুলির বেগের উপাংশ (Vertical Component) হয়

$$u=ft=\frac{X\varepsilon}{M}\cdot\frac{l}{2v}$$

A থেকে নির্গত $\alpha$-কণিকাগুলি স্পর্শকরেখা ধরে অগ্রসর হয়ে $t'=L/v$ সময়ে A এবং P ফোটোগ্রাফিক প্লেটের মধ্যেকার $L$ দূরত্ব অতিক্রম করে উক্ত প্লেটের উপর আপতিত হয়। P প্লেটের উপর পরিমিত বিচ্যুতি হয়

$$d=ut'=\frac{X\varepsilon l}{2Mv}\cdot\frac{L}{v}=\frac{X\varepsilon lL}{2Mv^2} \qquad (12·1)$$

(12·1) সমীকরণের সাহায্যে $\varepsilon/M$ নির্ণয় করা যায়। $\varepsilon/M$ নির্ণয় করতে হলে $\alpha$-কণিকাগুলির প্রাথমিক বেগ $v$ জানা দরকার। সেজন্য রাদারফোর্ড এবং রবিনসন চৌম্বক ক্ষেত্রে $\alpha$-কণিকাগুলির বিচ্যুতি পরিমাপ করেন।

এই উদ্দেশ্যে তাঁরা যে যন্ত্র ব্যবহার করেন তার কার্যপ্রণালী (12·3) চিত্রে প্রদর্শিত হয়েছে। তাঁরা কিছু পরিমাণ রেডন গ্যাসের মধ্যে একটি সরু প্ল্যাটিনাম তার কয়েকদিন ধরে রেখে দেন। ফলে $Rn^{222}$ আইসোটোপের বিঘটনের ফলে সৃষ্ট মৌলসমূহের সক্রিয় পরিন্যাস (Active Deposit) দ্বারা তারটি প্রলিপ্ত হয়ে যায় ( 11·7 অনুচ্ছেদ দ্রষ্টব্য )। এই তারটিকে $\alpha$-উৎস হিসাবে ব্যবহার করা হয়। এই ব্যবস্থায় প্রধানতঃ RaC′ থেকে নিঃসৃত $\alpha$-কণিকা নিয়ে পরীক্ষা করা যায়। (12·3) চিত্রে S

$\alpha$-কণিকার $\varepsilon/Mv$ নির্ণয়ের জন্য চৌম্বক ক্ষেত্রের মধ্যে কণিকাগুলির ভ্রমণপথের নিদর্শন। চৌম্বক ক্ষেত্রের দিক পুস্তকের পাতার অভিলম্বে।

চিত্র 12·3

হচ্ছে $\alpha$-কণিকার উৎস। নিঃসৃত কণিকাগুলি রশ্মিগুচ্ছের আকারে A রেখাছিদ্র পার হয়ে P ফোটোগ্রাফিক প্লেটের উপর আপতিত হয়। চিত্রতলের অভিলম্বে প্রযুক্ত $H$ চৌম্বক ক্ষেত্রের প্রভাবে $\alpha$-কণিকাগুলি চিত্রতলে $R$ ব্যাসার্ধ সম্পন্ন বৃত্তচাপ ধরে অগ্রসর হয়ে A রেখাছিদ্র পার হয় এবং SA সরলরেখার উপরের বা নিচের দিকে P ফোটোগ্রাফিক প্লেটের উপর একটি কৃষ্ণরেখা উৎপন্ন করে। চৌম্বক ক্ষেত্র বিপরীতমুখী করে SA সরলরেখার বিপরীত দিকে আর একটি অনুরূপ কৃষ্ণরেখা পাওয়া যায়। যেহেতু চৌম্বক ক্ষেত্রজ বলের মান হয় $H\varepsilon v/c$

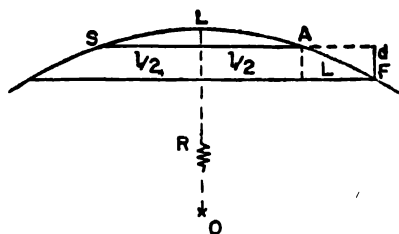
সুতরাং আমরা লিখতে পারি

$$\frac{H\varepsilon v}{c}=\frac{Mv^2}{R}$$

অথবা $$\varepsilon/Mvc=1/HR \qquad (12·2)$$

আবার (12·4) চিত্র থেকে প্রতীয়মান হয় যে যদি বৃত্তচাপের উচ্চতম বিন্দু L থেকে A রেখাছিদ্রের মধ্যবিন্দুর উল্লম্ব দূরত্ব $s$ হয়, তাহলে

$$(2R-s)s=(l/2)^2$$

অথবা $$2Rsl^2 \approx /4 \qquad (\because \quad s \leqslant 2R) \qquad (12·3)$$

বৃত্তচাপের ধর্ম ।

চিত্র 12·4

যেহেতু চৌম্বক ক্ষেত্র সমগ্র যন্ত্রটির উপর ক্রিয়া করে, A রেখাছিদ্র থেকে নির্গমনের পরও α-কণিকাগুলির উপর চৌম্বক ক্ষেত্রজ বল ক্রিয়া করে। ফলে যদি P ফোটোগ্রাফিক প্লেটের F বিন্দুতে α-কণিকাগুলি আপতিত হয় (12·4 চিত্র দ্রষ্টব্য ), তাহলে আমরা পাই

$$(2R-s-d)(s+d)=(l/2+L)^2$$

অথবা $$2R(s+d) \approx \frac{l^2}{4}+lL+L^2 \qquad (12·4)$$

$$(\because \quad s+d \leqslant 2R)$$

সমীকরণ (12·3) এবং (12·4) থেকে পাওয়া যায়

$$2Rd=lL+L^2$$

অর্থাৎ $$R=L(l+L)/2d$$

সুতরাং সমীকরণ (12·2) থেকে পাওয়া যায়

$$\varepsilon/Mvc=\frac{2d}{HL(l+L)} \qquad (12·5)$$

সমীকরণ (12·1) এবং (12·5) থেকে $\alpha$-কণিকাগুলির বেগ $v$ নির্ণয় করা যায়। তারপর (12·1) সমীকরণে $v$-এর মান বসিয়ে $\alpha$-কণিকার আপেক্ষিক আধান ($\varepsilon/M$) নির্ণয় করা যায়।

রাদারফোর্ড এবং রবিনসন্ $\alpha$-কণিকার আপেক্ষিক আধানের মান নির্ণয় করেন

$$\varepsilon/M = 4820 \ e.\ m.\ u.$$

## 12.3 : $\alpha$-কণিকার আধান এবং ভর নির্ণয়

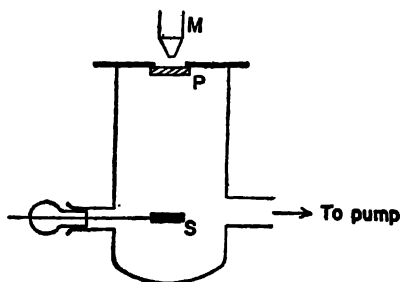
$\alpha$-কণিকার স্বরূপ নির্ণয় করিতে হলে এদের আধান $\varepsilon$ এবং ভর $M$ পৃথক পৃথকভাবে নিরূপণ করা প্রয়োজন। যদি আধান $\varepsilon$ পরীক্ষা দ্বারা পরিমাপ করা যায়, তাহলে উপরে প্রদত্ত আপেক্ষিক আধানের মান থেকে ভর $M$ নির্ণয় করা সম্ভব।

রাদারফোর্ড এবং গাইগার (Rutherford and Geiger) সর্বপ্রথম $\alpha$-কণিকার আধান নির্ণয় করেন। তাঁরা প্রথমতঃ একটি তেজস্ক্রিয় পদার্থ থেকে প্রতি সেকেণ্ডে মোট কতগুলি $\alpha$-কণিকা নিঃসৃত হয় তা পরিমাপ করেন। পরে তাঁরা উক্ত কণিকাগুলি মোট কতটা আধান বহন করে তা নির্ণয় করেন। এর থেকে প্রতিটি $\alpha$-কণিকা কতটা আধান বহন করে তা নির্ণয় করা হয়।

নির্দিষ্ট পরিমাণ তেজস্ক্রিয় পদার্থ থেকে প্রতি সেকেণ্ডে নিঃসৃত $\alpha$-কণিকার সংখ্যা নির্ণয় করতে হলে নিঃসৃত কণিকাগুলিকে একটির পর একটি করে গণনা করা প্রয়োজন। বর্তমান কালে $\alpha$, $\beta$ প্রভৃতি বিভিন্ন প্রকার আহিত কণিকাগুলিকে ব্যষ্টিগতভাবে (Individually) নির্দেশ (Detect) করার জন্য নানারূপ সূক্ষ্ম যন্ত্র উদ্ভাবিত হয়েছে ( পঞ্চদশ পরিচ্ছেদ দ্রষ্টব্য )। রাদারফোর্ড এবং গাইগার যখন বর্তমান শতাব্দীর গোড়ার দিকে ( ১৯০৫ সালে ) তাঁদের পরীক্ষা করেন তখন তাঁরা এই উদ্দেশ্যে প্রধানতঃ দুটি পদ্ধতি অবলম্বন করেন। যদিও এই সব পদ্ধতি আধুনিক $\alpha$-নির্দেশক পদ্ধতি সমূহের তুলনায় অনেক কম সুবেদী ছিল, তবুও তাঁরা বেশ সঠিক ভাবে পরিমাপ করতে সমর্থ হন।

এর মধ্যে একটি পদ্ধতিতে ZnS লিপ্ত একটি পর্দার উপরে $\alpha$-কণিকা কর্তৃক উৎপন্ন প্রতিপ্রভ রশ্মি নিরীক্ষণ করে কণিকাগুলির সংখ্যা গণনা করা হয়। X-রশ্মির মত উচ্চশক্তি $\alpha$-কণিকাগুলিও ZnS পর্দার উপর প্রতিপ্রভা

উৎপন্ন করতে পারে। অন্ধকার কক্ষের মধ্যে এইরূপ একটি প্রতিপ্রভ পর্দার কাছে যদি α-নিঃসারক তেজস্ক্রিয় পদার্থ রাখা যায় তাহলে পর্দাটি ক্ষীণ দৃশ্যমান আলোকে উদ্‌ভাসিত হতে দেখা যায়। প্রত্যেকটি আপতিত α-কণিকা প্রতিপ্রভ পর্দার উপরে আপতিত হয়ে একটা ক্ষণস্থায়ী দৃশ্যমান 'দীপ্তির চমক' (Scintillation) উৎপন্ন করে। যেহেতু পর্দাটির উপর একযোগে বহু সংখ্যক α-কণিকা আপতিত হতে থাকে, সেইজন্য এদের সামগ্রিক ক্রিয়ার ফলে খালি চোখে পর্দাটিকে নিরবচ্ছিন্ন ভাবে দীপ্তিমান বলে বোধ হয়। ব্যষ্টিগত ভাবে বিভিন্ন α-কণিকা কর্তৃক সৃষ্ট 'দীপ্তির চমক' বুঝতে পারা যায়না। কিন্তু যদি একটি অণুবীক্ষণ যন্ত্রের সাহায্যে প্রতিপ্রভ পর্দাটির উপর খুব স্বল্প পরিসর স্থানের উপর দৃষ্টি নিবদ্ধ রাখা যায় তা হলে ব্যষ্টিগত ভাবে প্রতিটি আপতিত α-কণিকা কর্তৃক সৃষ্ট ক্ষণস্থায়ী 'দীপ্তির চমক' পৃথক ভাবে নিরীক্ষণ করা সম্ভব। রাদারফোর্ড এবং গাইগার এইভাবে একটি প্রতিপ্রভ পর্দার খুব সংকীর্ণ ক্ষেত্রফলের উপরে প্রতি সেকেণ্ডে আপতিত α-কণিকার সংখ্যা গণনা করেন ( 12·5 চিত্র দ্রষ্টব্য )। যদি এই ক্ষেত্রফল হয় $S$, তেজস্ক্রিয় পদার্থ থেকে পর্দাটির দূরত্ব হয় $r$, এবং প্রতি সেকেণ্ডে তেজস্ক্রিয় পদার্থ থেকে মোট $N$ সংখ্যক α-কণিকা নিঃসৃত হয়, তাহলে $S$ ক্ষেত্রফলের উপর প্রতি সেকেণ্ডে আপতিত α-কণিকার সংখ্যা হবে

$$n = \frac{N}{4\pi r^2} S$$

রেগ্‌নার কর্তৃক α-কণিকার সংখ্যা নির্ণয় পদ্ধতি। S হচ্ছে একটি α-উৎস, P হচ্ছে একটি চমক উৎপাদক পর্দা এবং M হচ্ছে একটি অণুবীক্ষণ যন্ত্র।

চিত্র 12·5

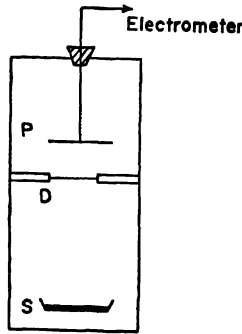
উপরের সমীকরণ থেকে তেজস্ক্রিয় পদার্থ থেকে α-কণিকা নিঃসরণের হার পাওয়া যায়

$$N=\frac{4\pi r^2 n}{S} \qquad (12\cdot6)$$

দ্বিতীয় পদ্ধতিতে তাঁরা গাইগার কর্তৃক উদ্ভাবিত গাইগার-সংখ্যায়ক (Geiger Counter) নামক যন্ত্র ব্যবহার করে α-কণিকার সংখ্যা নিরূপণ করেন। এই যন্ত্র সম্বন্ধে (15·3) অনুচ্ছেদে বিশদভাবে আলোচনা করা হবে। আয়নন কক্ষের মত এই যন্ত্রে বেলনাকৃতি একটি ধাতব ক্যাথোড এবং এর সঙ্গে সমাক্ষীয় একটি সরু ধাতব তার একটি নিম্ন বায়ুচাপ সম্পন্ন আবদ্ধ আধারের মধ্যে স্থাপিত থাকে। আধারের এক প্রান্তে অবস্থিত একটি পাতলা অভ্র-ফলকের দ্বারা আচ্ছাদিত জানালার ভিতর দিয়ে তেজস্ক্রিয় পদার্থ নিঃসৃত α-কণিকাগুলি সংখ্যায়কের মধ্যে প্রবেশ করতে পারে। ক্যাথোড ও অ্যানোডের মধ্যে প্রায় 1000 ভোল্টের মত বিভব প্রভেদ প্রয়োগ করা হয়। যখন একটি উচ্চশক্তি α-কণিকা আধারের ভিতরের নিম্নচাপ বায়ুর মধ্যে দিয়ে পরিভ্রমণ করে তখন কণিকাটি বায়ু মধ্যস্থ অণুগুলিকে আয়নিত করে বহু সংখ্যক ধনাত্মক এবং ঋণাত্মক আয়ন উৎপন্ন করে। এই আয়নগুলি আবার সংঘাতের দ্বারা নূতন আয়ন সৃষ্টি করে। এই সব আয়ন বিপরীত তড়িৎদ্বার কর্তৃক আকৃষ্ট হয়। ফলে আধারের বায়ুর মধ্যে একটি ক্ষণস্থায়ী তড়িৎস্ফুলিংগের সৃষ্টি হয়। অক্ষীয় তারটিকে একটি চতুষ্পাদ (Quadrant) ইলেকট্রোমিটার যন্ত্রের সংগে সংযুক্ত রাখা হয়। স্ফুলিংগ সৃষ্টির ফলে তারের উপর যখন হঠাৎ বিপুল সংখ্যক আয়ন এসে আপতিত হয় তখন ইলেকট্রোমিটারের কাঁটাটি বিচ্যুত হয়। সংখ্যায়কের ভিতরে প্রতিটি α-কণিকার অনুপ্রবেশ এইভাবে ইলেকট্রোমিটারের কাঁটার বিচ্যুতির দ্বারা নির্দেশিত হয়। এইরূপ বিচ্যুতির সংখ্যা গণনা করে সংখ্যায়কের মধ্যে α-কণিকার অনুপ্রবেশের হার নির্ণয় করা যায়। সংখ্যায়কের প্রবেশ মুখে অভ্রফলকে ঢাকা জানালার ক্ষেত্রফল এবং উক্ত জানালা থেকে তেজস্ক্রিয় উৎসের দূরত্ব জানা থাকলে (12·6) সমীকরণের সাহায্যে পরীক্ষাধীন তেজস্ক্রিয় পদার্থ থেকে প্রতি সেকেণ্ডে কতকগুলি α-কণিকা নির্গত হয় তা পরিমাপ করা যায়।

পরে ১৯১২ সালে রাদারফোর্ড এবং গাইগার চতুষ্পাদ ইলেকট্রোমিটারের বদলে একটি নিম্ন কম্পনকাল (Time Period) সম্পন্ন তন্তু-ইলেকট্রোমিটার (String Electrometer) যন্ত্র ব্যবহার করে α-কণিকার সংখ্যা পরিমাপ

পদ্ধতিকে অনেক বেশী সুবেদী (Sensitive) করতে সমর্থ হন। এই পদ্ধতিতে তাঁরা মিনিটে এক হাজার পর্যন্ত $\alpha$-কণিকার আপতন হার পরিমাপ করেন।

নির্দিষ্ট পরিমাণ তেজস্ক্রিয় পদার্থ ( রেডিয়াম ) থেকে $\alpha$-নিঃসরণ হার পরিমাপ করার পরে রাদারফোর্ড এবং গাইগার পরিমিত সংখ্যক $\alpha$-কণিকা কর্তৃক বাহিত মোট আধানের পরিমাণ নির্ণয় করেন। তাঁদের এই পরীক্ষা

রাদারফোর্ড ও গাইগার কর্তৃক উদ্‌ভাবিত $\alpha$-কণিকার আধান নির্ণয়ের জন্য পরীক্ষা ব্যবস্থা।
চিত্র 12·6

পদ্ধতি (12·6) চিত্রে প্রদর্শিত হয়েছে। S একটি অগভীর ক্ষুদ্র আধার যার মধ্যে নির্দিষ্ট পরিমাণ রেডিয়াম রেখে সেটিকে পাতলা অ্যালুমিনিয়ামের পাত দ্বারা আচ্ছাদিত করা হয়। এর ফলে $\alpha$-নিঃসারক প্রতিক্ষিপ্ত (Recoil) পরমাণুগুলি S পাত্র থেকে বেরিয়ে আসতে পারে না। নিঃসৃত $\alpha$-কণিকাগুলি নির্দিষ্ট ক্ষেত্রফল সম্পন্ন একটি খুব পাতলা মধ্যচ্ছদা (Diaphragm) D পার হয়ে একটি পাতলা অ্যালুমিনিয়ামের পাত দ্বারা আচ্ছাদিত P সংগ্রাহক প্লেটের উপর আপতিত হয়। সমগ্র যন্ত্রটি খুব নিম্ন বায়ু চাপে রাখা একটি আধারের মধ্যে অবস্থিত থাকে, যাতে নিঃসৃত $\alpha$-কণিকাসমূহ বায়বীয় অণুগুলির সঙ্গে সংঘাত প্রাপ্ত হয়ে বিক্ষিপ্ত (Scattered) না হতে পারে।

এই পরীক্ষায় যে তেজস্ক্রিয় পদার্থ ব্যবহার করা হয় তার থেকে $\beta$-কণিকাও নিঃসৃত হয়। এই $\beta$-কণিকাগুলি যাতে সংগ্রাহক প্লেটের উপরে আপতিত না হতে পারে সেজন্য একটি চুম্বকের সাহায্যে সেগুলিকে বিচ্যুত করা হয়।

তাছাড়া P প্লেট থেকে $\alpha$-কণিকার আঘাতে যে সব ইলেকট্রন ( $\delta$-রশ্মি ) নিঃসৃত হয়, সেগুলিও এই চুম্বকের ক্রিয়ার ফলে বিচ্যুত হয়ে P প্লেটের উপরেই ফিরে আসে।

সংগ্রাহক প্লেটটির সংগে সংযুক্ত ইলেকট্রোমিটার যন্ত্রের সাহায্যে নির্দিষ্ট সময়ের মধ্যে সংগৃহীত $\alpha$-কণিকাগুলি কর্তৃক বাহিত আধান $q$ পরিমাপ করা হয়। যদি D মধ্যচ্ছদার ক্ষেত্রফল হয় $S_1$ এবং $\alpha$-উৎস থেকে এর দূরত্ব হয় $r_1$ তাহলে P কর্তৃক প্রতি সেকেণ্ডে সংগৃহীত আধানের পরিমাণ হবে

$$q = \frac{N}{4\pi r_1^2} S_1 \varepsilon$$

এখানে $N$ হচ্ছে উৎস থেকে প্রতি সেকেণ্ডে নিঃসৃত $\alpha$-কণিকার সংখ্যা এবং $\varepsilon$ হচ্ছে প্রতিটি $\alpha$-কণিকার আধান। উপরের সমীকরণ থেকে পাওয়া যায়

$$\varepsilon = \frac{4\pi r_1^2 q}{N S_1} \tag{12.7}$$

সমীকরণ (12·6) থেকে নিরূপিত $N$ এর মান (12·7) সমীকরণে বসালে $\varepsilon$ পাওয়া যায়। রাদারফোর্ড এবং গাইগার $\alpha$-কণিকার আধানের মান $9.3 \times 10^{-10}$ *e.s.u.* নির্ণয় করেন।

পরে রেগ্‌নার (Regener) পোলোনিয়াম উৎস ব্যবহার করে $\varepsilon = 9.58 \times 10^{-10}$ *e.s.u.* পান। পরীক্ষার ত্রুটি-সীমার মধ্যে $\varepsilon$ এর এই মান ইলেকট্রনীয় আধানের প্রায় দ্বিগুণ। রেগ্‌নার কর্তৃক পরিমিত $\varepsilon$ এর মান ব্যবহার করলে (12·2) অনুচ্ছেদে প্রদত্ত $\varepsilon/M$ এর মান থেকে $\alpha$-কণিকার ভর পাওয়া যায়

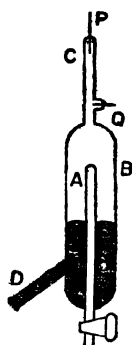
$$M = 6.62 \times 10^{-24} \text{ গ্রাম}$$

এই ভর হাইড্রোজেন পরমাণুর ভরের ($1.67 \times 10^{-24}$ গ্রাম ) প্রায় চারগুণ।

সুতরাং আমরা এই সিদ্ধান্তে উপনীত হতে পারি যে $\alpha$-কণিকাগুলির পরমাণবিক ভর হিলিয়ামের পরমাণবিক ভরের সমান এবং এরা দুই ইলেকট্রনীয় একক ধনাত্মক আধান বহন করে। অর্থাৎ এগুলি দুই ইলেকট্রনীয় আধান সম্পন্ন ধনাত্মক হিলিয়াম আয়ন ($He^{++}$) থেকে অভিন্ন।

## 12.4 : $\alpha$-কণিকার স্বরূপ নির্ণয়ের জন্য বর্ণালীবিষয়ক পরীক্ষা

$\alpha$-কণিকাগুলি যে প্রকৃতই দুই ইলেকট্রনীয় আধানবাহী হিলিয়াম পরমাণুর ধনাত্মক আয়ন সে সম্বন্ধে নিঃসন্দেহ হবার জন্য রাদারফোর্ড এবং রয়ড্‌স্ (Rutherford and Royds) ১৯০৯ সালে নিম্নে বর্ণিত বর্ণালীবিষয়ক (Spectroscopic) পরীক্ষাটি অনুষ্ঠিত করেন।

(12·7) চিত্রে এই পরীক্ষা পদ্ধতি প্রদর্শিত হয়েছে। A হচ্ছে একটি খুব পাতলা কাঁচের নল, যার মধ্যে কিছু পরিমাণ রেডন ($Rn^{222}$) গ্যাস আবদ্ধ

চিত্র 12·7
$\alpha$-কণিকার স্বরূপ নির্ণয়ের জন্য রাদারফোর্ড কর্তৃক উদ্‌ভাবিত বর্ণালীবিষয়ক পরীক্ষা ব্যবস্থা।

করে রাখা হয়। $Rn^{222}$ পরমাণুগুলির বিঘটনের ফলে নিঃসৃত $\alpha$-কণিকা সমূহ A কাঁচনলের পাতলা গাত্র ভেদ করে নির্গত হতে পারে। A নলটিকে অপেক্ষাকৃত পুরু B কাঁচনলের মধ্যে রেখে নল দুটিকে সীল (Seal) করে সংযুক্ত করা হয়। B নলটির উপরিভাগের সংগে সংলগ্ন C একটি কৈশিক নল (Capillary Tube) সীল করা থাকে। C নলটির মধ্যে দুটি তড়িৎদ্বার P এবং Q সীল করে অনুপ্রবেশ করান থাকে যাতে P এবং Q এর মধ্যে ইচ্ছামত বিভব প্রভেদ প্রয়োগ করা যায়। B নলের সংলগ্ন D পার্শ্বনলের সংগে সংযুক্ত রবার নলের সাহায্যে একটি পারদপূর্ণ পাত্রের যোগাযোগ থাকে, যাতে উক্ত পারদপূর্ণ পাত্রটিকে উঠিয়ে বা নামিয়ে B নলের নিম্নভাগে রক্ষিত পারদের তল ইচ্ছামত উঠা-নামা করান যায়।

পরীক্ষার শুরুতে A এবং C নল দুটির মধ্যে পাম্পের সাহায্যে বায়ুর চাপ খুব নিম্ন করা হয়। রেডন গ্যাস থেকে নিঃসৃত α-কণিকাগুলি A নলের পাতলা গাত্র ভেদ করে B নলের বহির্গাত্রে প্রবেশ করে। B নলের কাঁচ নির্মিত গাত্র থেকে ইলেকট্রন সংগ্রহ করে সেগুলি আধানহীন হিলিয়াম পরমাণুতে রূপান্তরিত হয়। পরে এই হিলিয়াম পরমাণুগুলি B নলের বায়ুশূন্য স্থানে ব্যাপ্ত হয়ে পড়ে। কয়েকদিন অপেক্ষা করার পর B নলে যথেষ্ট পরিমাণ হিলিয়াম গ্যাস সংগৃহীত হয়। এখন পারদপূর্ণ আধারটির অবস্থান প্রয়োজন মত উঠিয়ে-নামিয়ে B নলের পারদের তল উপরের দিকে ওঠান হয়, যাতে উক্ত নলে সংগৃহীত হিলিয়াম গ্যাস আয়তনে সংকুচিত হয়ে C কৈশিক নলের মধ্যে আবদ্ধ হয়ে থাকে।

এরপরে C নলের তড়িৎদ্বার দুটির মধ্যে উচ্চ বিভব প্রভেদ প্রয়োগ করে একটি দীপ্তিমান মোক্ষণ উৎপন্ন করা হয়। এই মোক্ষণ থেকে নিঃসৃত আলোক একটি বর্ণালীমাপক যন্ত্রের (Spectrometer) সাহায্যে বিশ্লেষণ করে যে সব বর্ণালীরেখা পাওয়া যায় সেগুলির তরঙ্গদৈর্ঘ্য সাধারণ হিলিয়াম মৌলের বর্ণালী-রেখার তরঙ্গদৈর্ঘ্য থেকে অভিন্ন। এর থেকে রাদারফোর্ড এবং রয়ড্‌স্ সংশয়াতীত ভাবে প্রমাণ করেন যে α-কণিকাগুলি দুই একক আধানবাহী ধনাত্মক হিলিয়াম আয়ন ছাড়া আর কিছুই নয়। পরবর্তী যুগে যখন পরমাণু-কেন্দ্রক সম্বন্ধে বিজ্ঞানীদের ধারণা আরও সুস্পষ্ট হয়, তখন বোঝা যায় এই আয়নগুলি প্রকৃতপক্ষে হিলিয়াম পরমাণুর কেন্দ্রক।

## 12.5 : α-কণিকার বেগ নির্ণয়

ইতিপূর্বে উল্লেখ করা হয়েছে α-কণিকাগুলি তেজস্ক্রিয় পদার্থ থেকে অতি উচ্চ বেগে নিঃসৃত হয়। α-কণিকার বেগ চৌম্বক বর্ণালীলেখ (Magnetic Spectrograph) নামক যন্ত্রের সাহায্যে পরিমাপ করা যায়। রোজেনব্লুম (Rosenblum) কর্তৃক উদ্ভাবিত এই যন্ত্রে একটি খুব সূক্ষ্ম তারের উপরে প্রলিপ্ত তেজস্ক্রিয় পদার্থ থেকে নিঃসৃত α-কণিকাগুলি একটি রেখাছিদ্রের ভিতর দিয়ে রশ্মিগুচ্ছের আকারে পার হয়ে আসে। রশ্মিগুচ্ছের ভ্রমণপথের অভিলম্বে প্রযুক্ত উচ্চ চৌম্বক ক্ষেত্রের প্রভাবে α-কণিকাগুলি বৃত্তাকার পথে পরিভ্রমণ করে। উৎস থেকে নির্গত স্বল্প পরিমাণে অপসারী (Divergent) সমবেগ সম্পন্ন α-কণিকাগুলি অর্ধবৃত্তাকার পথ অতিক্রম করার পর একটি ফোটোগ্রাফিক প্লেটের উপরে

ফোকাসিত হয়ে একটি কৃষ্ণরেখা উৎপন্ন করে। সমগ্র যন্ত্রটি একটি খুব নিম্ন বায়ুচাপ সম্পন্ন আবদ্ধ আধারের মধ্যে অবস্থিত থাকে। এই যন্ত্রের গঠন এবং কার্যপ্রণালী (13.3) অনুচ্ছেদে বর্ণিত $\beta$-রশ্মি বর্ণালীলেখ যন্ত্রের অনুরূপ।

$\alpha$-কণিকাগুলির বেগ যদি হয় $v$ এবং তাদের পরিভ্রমণ পথের ব্যাসার্ধ হয় $r$, তাহলে চৌম্বক ক্ষেত্রজ বল এবং অপকেন্দ্রিক বলের সমতা থেকে আমরা পাই

$$H\varepsilon v/c = Mv^2/r$$

সুতরাং $$v = H\varepsilon r/Mc \qquad (12 \cdot 8)$$

সমীকরণ (12·8) থেকে $\alpha$-কণিকার বেগ নির্ণয় করা যায়। রোজেনব্লুমের পরীক্ষায় প্রযুক্ত চৌম্বক ক্ষেত্রের মান খুব উচ্চ ছিল (প্রায় 36,000 গাওস)। পরে রাদারফোর্ড এবং তাঁর সহযোগীবৃন্দ $\alpha$-নির্দেশক (Detector) হিসাবে ফোটোগ্রাফিক প্লেটের বদলে আয়নন কক্ষ (Ionization Chamber) ব্যবহার করে একটি অনুরূপ যন্ত্রের সাহায্যে বিভিন্ন তেজস্ক্রিয় পদার্থ থেকে নিঃসৃত $\alpha$-কণিকার বেগ নির্ণয় করেন। পরবর্তী যুগে আরও উন্নত ধরণের চৌম্বক বর্ণালীলেখ যন্ত্রের সাহায্যে অনেকে খুব সঠিকভাবে বিভিন্ন তেজস্ক্রিয় পদার্থ থেকে নির্গত $\alpha$-কণিকার বেগ পরিমাপ করেন।

এই সমস্ত পরিমাপ থেকে নিম্নলিখিত তথ্যগুলি পাওয়া যায়। বেশীর ভাগ প্রাকৃতিক তেজস্ক্রিয় পদার্থ থেকে নিঃসৃত $\alpha$-কণিকার বেগের মাত্রা $10^9$ সেমি/সেকেণ্ডের মত হয়। অনেক মৌলের ক্ষেত্রে ফোটোগ্রাফিক প্লেটের উপর একটি মাত্র $\alpha$-রেখা পাওয়া যায় ; অর্থাৎ এইসব ক্ষেত্রে নির্দিষ্ট আইসোটোপ থেকে নিঃসৃত $\alpha$-কণিকাগুলি সব সমবেগ সম্পন্ন হয়। কোন কোন ক্ষেত্রে একই আইসোটোপ থেকে একাধিক কাছাকাছি অবস্থিত অবচ্ছিন্ন (Discrete) $\alpha$-রেখা পাওয়া যায়। অর্থাৎ এইসব ক্ষেত্রে নির্দিষ্ট আইসোটোপ থেকে নিঃসৃত $\alpha$-কণিকাগুলির মধ্যে দুই বা ততোধিক সমবেগ সম্পন্ন $\alpha$-গুচ্ছ দেখা যায়। প্রতিটি গুচ্ছের অন্তর্গত সব $\alpha$-কণিকার বেগ সমান হয়। বিভিন্ন গুচ্ছের ক্ষেত্রে এই বেগের মান পৃথক হয়। যেহেতু গতিশক্তি বেগের উপর নির্ভরশীল, সুতরাং প্রথমোক্ত শ্রেণীর $\alpha$-নিঃসারক আইসোটোপ থেকে নিঃসৃত সমস্ত $\alpha$-কণিকার গতিশক্তি সমান হয়। দ্বিতীয়

ক্ষেত্রে নির্দিষ্ট আইসোটোপ থেকে নিঃসৃত বিভিন্ন α-গুচ্ছের গতিশক্তি ভিন্ন হয়।

নিঃসৃত α-কণিকাগুলির গতিশক্তি $E_k = Mv^2/2$ নিরূপণ করলে দেখা যায় যে এই গতিশক্তি সাধারণতঃ 5 থেকে 10 মিলিয়ন ($10^6$) ইলেকট্রন-ভোল্টের ( মি-ই-ভো ) মত হয়।

## 12·6 : α-বিঘটন শক্তি

বিঘটনের পূর্বে α-নিঃসারক কেন্দ্রক সাধারণতঃ স্থির অবস্থায় থাকে। অর্থাৎ এর প্রাথমিক ভরবেগ শূন্য হয়। ভরবেগ সংরক্ষণ সূত্র অনুযায়ী প্রাথমিক এবং চরম (Final) ভরবেগ পরস্পরের সমান হবে। সুতরাং α-বিঘটনের ক্ষেত্রে সৃষ্ট কণিকা সমূহের মোট ভরবেগ শূন্য হওয়া উচিত। বিঘটনের ফলে নিঃসৃত α-কণিকাটির নির্দিষ্ট গতিশক্তি থাকে। সুতরাং এর একটা নির্দিষ্ট ভরবেগও থাকে। প্রশ্ন উঠতে পারে তাহলে এক্ষেত্রে ভরবেগ সংরক্ষিত হয় কী করে? এই প্রশ্নের উত্তর পাওয়া যায় যদি α-নিঃসরণের পর অবশিষ্ট (Residual) কেন্দ্রকটির গতি বিবেচনা করা যায়। ভরবেগ সংরক্ষণ করতে হলে নিঃসৃত α-কণিকার গতির বিপরীত দিকে এই অবশিষ্ট কেন্দ্রকটির একটা প্রতিক্ষেপ গতি (Recoil Motion) থাকা প্রয়োজন। এই প্রতিক্ষেপের জন্য স্পষ্টতঃ এর কিছুটা গতিশক্তি থাকবে। এই শক্তির পরিমাণ সাধারণতঃ নিঃসৃত α-কণিকার গতিশক্তির তুলনায় অনেক কম হয়, কারণ অবশিষ্ট কেন্দ্রকটির ভর α-কণিকার ভর অপেক্ষা অনেক বেশী হয়।

স্পষ্টতঃ তেজস্ক্রিয় বিঘটনের ফলে উৎপন্ন মোট শক্তি নিঃসৃত α-কণিকা এবং প্রতিক্ষিপ্ত কেন্দ্রকের গতিশক্তির সমষ্টির সমান হবে। ভরবেগ এবং শক্তি সংরক্ষণ সূত্র দুটির সাহায্যে মোট বিঘটন শক্তি নিরূপণ করা যায়।

ধরা যাক যে $A$ ভর-সংখ্যা (Mass Number) এবং $Z$ পরমাণবিক সংখ্যা (Atomic Number) সম্পন্ন একটি কেন্দ্রক (X) থেকে α-কণিকা নিঃসৃত হওয়ার ফলে অবশিষ্ট Y কেন্দ্রকটি সৃষ্ট হয়। অর্থাৎ

$$_{Z}X^{A} \rightarrow {}_{Z-2}Y^{A-4} + {}_{2}He^{4}$$

যদি α-কণিকা এবং অবশিষ্ট কেন্দ্রকের ভর ও বেগ হয় যথাক্রমে $M_a$, $M_1$ এবং $v_a$, $v_1$, তাহলে ভরবেগ সংরক্ষণ সূত্র থেকে পাওয়া যায়

$$M_a v_a = M_1 v_1$$

আবার $Q$ যদি হয় $\alpha$-বিঘটন-শক্তি (Disintegration Energy) তাহলে উপরে প্রদত্ত আলোচনার ভিত্তিতে লেখা যায়

$$Q = \tfrac{1}{2}M_\alpha v_\alpha^2 + \tfrac{1}{2}M_1 v_1^2$$
$$= \tfrac{1}{2}M_\alpha v_\alpha^2 + \frac{1}{2}\frac{M_\alpha^2}{M_1} v_\alpha^2$$
$$= \tfrac{1}{2}M_\alpha v_\alpha^2(1 + M_\alpha/M_1)$$

যদি $E_\alpha = \tfrac{1}{2}M_\alpha v_\alpha^2$ হয় নিঃসৃত $\alpha$-কণিকার গতিশক্তি, তাহলে আমরা পাই

$$Q = \frac{M_1 + M_\alpha}{M_1} \cdot E_\alpha$$

যেহেতু কেন্দ্রক দুটির এবং $\alpha$-কণিকার ভর এদের ভর-সংখ্যার (Mass Number) প্রায় সমান হয়, অতএব লেখা যায়

$M_1 \simeq A - 4$ এবং $M_\alpha \simeq 4$ ; সুতরাং

$$Q = \frac{A}{A-4} \cdot E_\alpha \qquad (12\text{·}9)$$

যেহেতু পরীক্ষার দ্বারা $E_\alpha$ নিরূপণ করা যায়, অতএব সমীকরণ (12·9) থেকে $\alpha$-বিঘটন শক্তি $Q$ নির্ণয় করা সম্ভব। স্পষ্টতঃ $Q > E_\alpha$ হয়।

বিভিন্ন তেজস্ক্রিয় কেন্দ্রকের $\alpha$-বিঘটন শক্তির সঠিক পরিমাণ তাত্ত্বিক দিক থেকে অত্যন্ত গুরুত্বপূর্ণ। কেন্দ্রক রূপান্তরের (Nuclear Transformation) ফলে যে শক্তি উৎপন্ন হয় তার উৎস হচ্ছে উক্ত রূপান্তরে অংশ গ্রহণকারী কেন্দ্রকসমূহের ভর। এই সব কেন্দ্রকের ভরের কিছু অংশ আইনষ্টাইনের ভর-শক্তি সমীকরণ ($E = mc^2$) অনুযায়ী শক্তিতে রূপান্তরিত হয় ( সমীকরণ 8·26 দ্রষ্টব্য )। $\alpha$-বিঘটনের ক্ষেত্রে যে বিপুল পরিমাণ শক্তি নিঃসৃত হয়, তার উৎপত্তি এই ভাবেই হয়। বিঘটনশীল কেন্দ্রকের ভরের অল্প অংশ শক্তিতে রূপান্তরিত হয়। *এই শক্তিই হচ্ছে $\alpha$-বিঘটন শক্তি।* স্পষ্টতঃ $\alpha$-বিঘটন তখনই সম্ভব যখন বিঘটনশীল কেন্দ্রকের ভর $\alpha$-কণিকা এবং অবশিষ্ট কেন্দ্রকের মোট ভর অপেক্ষা অধিক হয় ; অর্থাৎ যখন $M > M_\alpha + M_1$ হয়। $\alpha$-বিঘটন শক্তির মান এই অসমীকরণের

(Inequality) দুইদিকের সংখ্যাগুলির অন্তরফল এবং $c^2$ এর গুণফলের সমান হয় ঃ

$$Q=(M-M_\alpha-M_1)c^2 \tag{12·10}$$

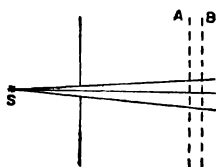
স্থায়ী পরমাণুসমূহের পরমাণবিক ভর ভরবর্ণালীমাপক যন্ত্রের সাহায্যে খুব সঠিকভাবে নিরূপণ করা যায় ( ষোড়শ পরিচ্ছেদ দ্রষ্টব্য )। তেজস্ক্রিয় মৌলসমূহের ক্ষেত্রে এই পদ্ধতি সাধারণতঃ প্রযোজ্য নয়। কিন্তু $\alpha$-নিঃসারক মৌলের ক্ষেত্রে $\alpha$-বিঘটন শক্তি পরিমাপ করে (12·10) সমীকরণের সাহায্যে পরমাণবিক ভর নির্ণয় করা সম্ভব।

### 12.7 : $\alpha$-কণিকার পথসীমা

ইতিপূর্বে উল্লেখ করা হয়েছে যে $\alpha$-কণিকাগুলি খুব সহজেই বিভিন্ন পদার্থের দ্বারা শোষিত (Absorbed) হয়ে যায়। পাতলা কাগজ, খুব পাতলা অভ্রের বা ধাতুর পাত প্রভৃতি ভেদ করে $\alpha$-কণিকাগুলি নির্গত হতে পারে, কিন্তু এইরূপ কয়েক পর্দা কাগজ বা ধাতব পাত তারা ভেদ করে যেতে পারে না। বাতাসের মধ্যে দিয়েও $\alpha$-কণিকাগুলি উৎস থেকে কয়েক সেণ্টি-মিটার দূরত্ব পর্য্যন্ত ভ্রমণ করতে পারে, তারপর তারা তাদের সমস্ত গতিশক্তি হারিয়ে ফেলে। বিভিন্ন বস্তু নিয়ে পরীক্ষা করে দেখা গেছে যে নির্দিষ্ট প্রাথমিক শক্তি সম্পন্ন $\alpha$-কণিকাগুলি নির্দিষ্ট কোন পদার্থের মধ্যে উৎস থেকে একটা দীর্ঘতম দূরত্ব পর্যন্ত পরিভ্রমণ করতে পারে। এই দূরত্বকে বলা হয় $\alpha$-কণিকাগুলির 'পথসীমা' (Range)। কঠিন বা তরল পদার্থের মধ্যে এই পথসীমার মান খুব কম হয়। গ্যাসের মধ্যে সাধারণতঃ $\alpha$-কণিকার পথসীমা অপেক্ষাকৃত অনেক বেশী হয়, কারণ গ্যাসের ঘনত্ব খুব কম। গ্যাসীয় পদার্থের ক্ষেত্রে $\alpha$-কণিকার পথসীমা গ্যাসের চাপ এবং উষ্ণতার উপরে নির্ভর করে। চাপ বৃদ্ধির সংগে পথসীমা কম হয়; উষ্ণতা বৃদ্ধি করলে পথসীমাও বৃদ্ধি পায়।

কোন নির্দিষ্ট বস্তুর মধ্যে $\alpha$-কণিকার পথসীমা নির্ভর করে কণিকাগুলির প্রাথমিক বেগ বা গতিশক্তির উপর। সেইজন্য খুব সঠিকভাবে $\alpha$-কণিকার পথসীমা পরিমাপ করলে তাদের প্রাথমিক বেগ বা গতিশক্তি পাওয়া যায়।

$\alpha$-কণিকার পথসীমা পরিমাপ করার নানারূপ পদ্ধতি আছে। ব্র্যাগ (W. H. Bragg) বিভিন্ন গ্যাসে $\alpha$-কণিকা কর্তৃক উৎপন্ন আয়নন প্রবাহ

পরিমাপ করে সর্বপ্রথম এদের পথসীমা নির্ণয় করেন। তাঁর ব্যবহৃত পরীক্ষা ব্যবস্থা (12·8) চিত্রে প্রদর্শিত হয়েছে।

চিত্র 12·8
α-কণিকার পথসীমা নির্ণয়ের জন্য ব্র্যাগের পরীক্ষা ব্যবস্থা।

S উৎস থেকে নিঃসৃত α-কণিকাগুলি একটি সীসার পর্দার মধ্যেকার ছিদ্র পার হয়ে সমান্তরিত (Collimated) হয়। এই সমান্তরিত α-রশ্মিগুচ্ছ তারপর দুটি খুব কাছাকাছি অবস্থিত সমান্তরাল তারজালি A এবং B এর অন্তর্বর্তী স্থানে প্রবেশ করে। পূর্বেই উল্লেখ করা হয়েছে যে α-কণিকাগুলির গ্যাসকে আয়নিত করবার ক্ষমতা আছে। গ্যাসের মধ্য দিয়ে পরিভ্রমণ কালে α-কণিকাগুলি গ্যাসের পরমাণুগুলির সংগে বরাবর সংঘাত প্রাপ্ত হয়। প্রত্যেকবার সংঘাতকালে কণিকাগুলির শক্তির স্বল্পাংশ উক্ত পরমাণুগুলিতে হস্তান্তরিত হয়। ফলে পরমাণুগুলি আয়নিত হয় এবং ধনাত্মক ও ঋণাত্মক উভয় প্রকার আয়ন সৃষ্ট হয়। α-কণিকাগুলির পরিভ্রমণ পথের সর্বত্র এইভাবে বিপুল সংখ্যক আয়ন-যুগল উৎপন্ন হয়। এদের মধ্যে যে সব আয়ন তারজালি দুটির মধ্যবর্তী স্থানে উৎপন্ন হয় সেগুলি এদের মধ্যে প্রযুক্ত বিভব প্রভেদের প্রভাবে তারজালিগুলির দিকে আকৃষ্ট হয়। ধনাত্মক আয়নগুলি যায় ঋণাত্মক জালিটির দিকে এবং ঋণাত্মক আয়নগুলি অন্যটির দিকে আকৃষ্ট হয়। এই ভাবে তারজালি দুটির মধ্যে একটা আয়নন প্রবাহ সৃষ্ট হয়। এই আয়নন প্রবাহ তারজালিগুলির সংগে সংযুক্ত ইলেকট্রমিটার যন্ত্রের সাহায্যে পরিমাপ করা হয়। সাধারণতঃ জালিদুটির মধ্যে বিভব প্রভেদের মাত্রা এমন রাখা হয় যে আয়নন প্রবাহমাত্রা সম্পৃক্ত হয়। অর্থাৎ জালিদুটির মধ্যে উৎপন্ন সব আয়নগুলিই আকর্ষণের ফলে তাদের উপর এসে পড়ে। স্পষ্টতঃ এই সম্পৃক্ত আয়নন প্রবাহের মান A এবং B এর মধ্যে α-কণিকা কর্তৃক উৎপন্ন আয়নযুগলের সংখ্যার, অর্থাৎ আয়নন ক্ষমতার সমানুপাতিক হয়।

ব্র্যাগ তাঁর পরীক্ষায় তারজালি দুটির মধ্যেকার ব্যবধান অপরিবর্তিত রেখে সে দুটিকে α-উৎস S থেকে বিভিন্ন দূরত্বে অপসারিত করে তাদের মধ্যেকার

আয়নন প্রবাহ পরিমাপ করেন। তারপর তিনি এই পরিমিত আয়নন প্রবাহ এবং উৎস থেকে A এবং B জালি দুটির গড় দূরত্বের লেখচিত্র অংকন করেন। নির্দিষ্ট প্রাথমিক শক্তি সম্পন্ন $\alpha$-কণিকার ক্ষেত্রে ব্র্যাগ কর্তৃক প্রাপ্ত এইরূপ আয়নন লেখচিত্রের নিদর্শন (12·9) চিত্রে প্রদর্শিত হয়েছে।

চিত্র 12·9
ব্র্যাগ কর্তৃক প্রাপ্ত আয়নন লেখচিত্রের নিদর্শন।

(12·9) চিত্র থেকে দেখা যায় যে উৎস থেকে যত দূরে চলে আসে $\alpha$-কণিকার আয়নন ক্ষমতা তত বৃদ্ধি পায়। এই বৃদ্ধি প্রথমে খুব ধীরে এবং পরে অপেক্ষাকৃত দ্রুত ঘটতে থাকে। অবশেষে আয়নন ক্ষমতা একটা উচ্চতম মান প্রাপ্ত হয়। এর পরে $\alpha$-কণিকার আয়নন ক্ষমতা খুব দ্রুত হ্রাস পায় এবং পরিশেষে উৎস S থেকে একটা নির্দিষ্ট দূরত্বে এর মান শূন্য হয়ে যায়। এই নির্দিষ্ট দূরত্বই হচ্ছে $\alpha$-কণিকাগুলির 'পথসীমা'।

(12·9) চিত্র থেকে দেখা যায় যে আয়নন প্রবাহের মান উচ্চতম বিন্দু থেকে প্রায় খাড়া নীচের দিকে নেমে এসে শূন্য হয়ে যাবার ঠিক আগে লেখচিত্রটি অল্প পরিমাণে বক্র হয়ে যায়। এই বক্র অংশের উৎপত্তি হয় তথাকথিত 'পথসীমা মানচ্যুতি'র (Straggling of Range) জন্য। এইরূপ পথসীমা মানচ্যুতি ঘটবার কারণ হচ্ছে যে নির্দিষ্ট প্রাথমিক শক্তি সম্পন্ন একটি $\alpha$-কণিকা কোন নির্দিষ্ট পথ পরিভ্রমণ করতে পদার্থের মধ্যে মোট কতগুলি সংঘাত লাভ করবে তা সম্ভাব্যতা-সূত্র (Law of Probability) দ্বারা নির্ধারিত হয়। একই প্রাথমিক শক্তি সম্পন্ন বিভিন্ন $\alpha$-কণিকার ক্ষেত্রে এই সংখ্যা অল্প পরিমাণে ভিন্ন হয়। যদি নির্দিষ্ট পথ অতিক্রম করতে $\alpha$-কণিকাগুলি গড়ে $n$ বার সংঘাত লাভ করে, তাহলে বিভিন্ন $\alpha$-কণিকা কর্তৃক প্রাপ্ত সংঘাতের সংখ্যার মধ্যে যে তারতম্য ঘটে তার মান প্রায় $\sqrt{n}$ হয়। তাছাড়া সংঘাতের দ্বারা আয়নযুগল সৃষ্টি করতে একটি $\alpha$-কণিকা যে শক্তি ব্যয় করে ( প্রায়

চিত্র 12·10

মেঘ-কক্ষের সাহায্যে প্রাপ্ত $\alpha$-কণিকা ভ্রমণপথের আলোকচিত্র ।

( কেম্‌ব্রিজ ইউনিভার্সিটি প্রেস কর্তৃক প্রকাশিত রাদারফোর্ড, চ্যাড্‌উইক ও এলিস্‌ প্রণীত Radiations from Radioactive Substances গ্রন্থ থেকে প্রাপ্ত )

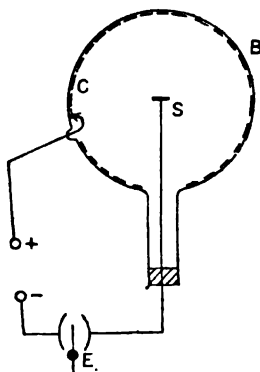
35 ই-ভো ) তাও বিভিন্ন সংঘাতের ক্ষেত্রে অল্প পরিমাণে পৃথক হয়। এই সব কারণে উৎস থেকে যে দূরত্ব পর্য্যন্ত যাবার পরে কণিকাগুলি তাদের সমগ্র শক্তি হারিয়ে ফেলে তা সমান আদি শক্তি সম্পন্ন বিভিন্ন $\alpha$-কণিকার ক্ষেত্রে অল্প পরিমাণে ভিন্ন হয়। পথসীমা মানচ্যুতির পরিমাণ প্রায় শতকরা এক থেকে দুই ভাগ হয়। আয়নন লেখচিত্রের উচ্চতম বিন্দু থেকে প্রায় খাড়া নেমে আসা রেখাটির 'নতি-পরিবর্তন বিন্দুতে' (Point of Inflection) অংকিত স্পর্শক রেখা (Tangent) $X$-অক্ষকে যে বিন্দুতে ছেদ করে সেই বিন্দুতে দূরত্বের যে মান পাওয়া যায় তাকেই সাধারণতং $\alpha$-কণিকাগুলির 'আয়নন-বহির্ন্যস্ত পথসীমা' (Ionization Extrapolated Range) ধরা হয়।

এইখানে উল্লেখযোগ্য যে একটি $\alpha$-কণিকা A এবং B তারজালি দুটির মধ্যে যতগুলি আয়নযুগল উৎপন্ন করে সেই সংখ্যাকে যদি এদের মধ্যেকার ব্যবধান দিয়ে ভাগ করা যায় তাহলে $\alpha$-কণিকা কর্তৃক সৃষ্ট 'আয়নন ঘনত্ব' (Specific Ionization) পাওয়া যায়। স্পষ্টতঃ এই 'আয়নন ঘনত্ব' উৎস থেকে $\alpha$-কণিকা কর্তৃক অতিক্রান্ত দূরত্বের উপর নির্ভর করে। RaC′ থেকে নিঃসৃত $\alpha$-কণিকার ক্ষেত্রে ($E_\alpha = 7{\cdot}68$ মি-ই-ভো ) উচ্চতম আয়নন-ঘনত্বের মান হয় প্রায় 60,000 আয়ন যুগল/সেমি।

(12·9) চিত্র থেকে দেখা যায় যে উৎস থেকে $\alpha$-কণিকার দূরত্ব যত বৃদ্ধি পায়, কণিকাগুলির আয়নন ঘনত্বও তত বৃদ্ধি পায়। এর কারণ কণিকাগুলি নির্গত হয়ে গ্যাসের মধ্যে যত অগ্রসর হতে থাকে ততই তাদের গতিশক্তি হ্রাস পেতে থাকে, অর্থাৎ তাদের বেগও কমতে থাকে। অপেক্ষাকৃত মন্থরগতি $\alpha$-কণিকাসমূহ গ্যাসের পরমাণুগুলির সন্নিকটে দীর্ঘতর সময় অতিবাহিত করে। ফলে সেগুলি ঐসব পরমাণুকে আয়নিত করবার বেশী সুযোগ পায়। এই কারণেই কণিকাগুলি যখন তাদের পথের প্রায় শেষ সীমায় উপস্থিত হয় তখন তাদের আয়নন ঘনত্বও উচ্চতম হয়।

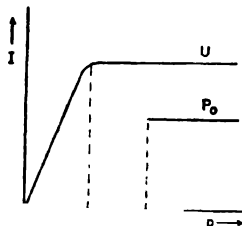
$\alpha$-কণিকাগুলির পথসীমা নিরূপণের আরও অন্যান্য পদ্ধতি আছে। (15·2) অনুচ্ছেদে বর্ণিত উইলসন মেঘ-কক্ষের (Wilson Cloud Chamber) সাহায্যে নির্দিষ্ট গ্যাসের মধ্যে $\alpha$-কণিকাগুলির প্রত্যেকটির ভ্রমণ-পথের (Track) আলোকচিত্র গ্রহণ করা সম্ভব। (12·10) চিত্রে এইরূপ একটি আলোকচিত্র দেখান হয়েছে। এই চিত্রে ব্যষ্টিগত ভাবে (Individually) বিভিন্ন $\alpha$-কণিকার ভ্রমণপথ দেখা যায়। এই সরলরেখা ভ্রমণ-পথগুলির প্রত্যেকটির দৈর্ঘ্য প্রায় সমান। এই দৈর্ঘ্য পরিমাপ করে

α-কণিকাগুলির পথসীমা (Range) পাওয়া যায়। (12·10) চিত্র থেকে সুস্পষ্টরূপে প্রতীয়মান হয় যে একই প্রাথমিক শক্তি সম্পন্ন α-কণিকা সমূহের পথসীমা প্রায় সমান হয়। চিত্র থেকে α-কণিকাগুলির পথসীমা মানচ্যুতির (Straggling of Range) নিদর্শনও দেখা যায়। এখানে উল্লেখযোগ্য যে (12·10) চিত্র সৃষ্টিকারী α-কণিকাগুলির উৎস ছিল ThC এবং ThC′ মৌলদ্বয়ের মিশ্রণ। সেজন্য উক্ত চিত্রে দুটি বিভিন্ন পথসীমা সম্পন্ন α-গুচ্ছের নিদর্শন দেখতে পাওয়া যায়।

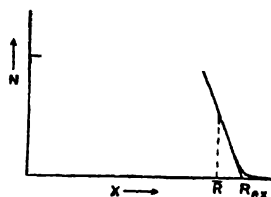
গাইগার ও নাটাল (Geiger and Nuttal) নামক রাদারফোর্ডের দুই সহকর্মী অন্য এক পদ্ধতিতে α-কণিকার পথসীমা পরিমাপ করেন। B একটি গোলকাকৃতি (Spherical) কাঁচের বাল্‌ব (Bulb) যার ঠিক কেন্দ্রস্থলে একটি ধাতব দণ্ডের উপর α-উৎস S স্থাপিত থাকে ( 12·11 চিত্র দ্রষ্টব্য )। বাল্‌বের ভিতরের গাত্রে পাতলা রুপার প্রলেপ থাকে, যাতে α-উৎস এবং

চিত্র 12·11

α-কণিকার পথসীমা নির্ণয়ের জন্য গাইগার ও নাটালের পরীক্ষা ব্যবস্থা। E হচ্ছে একটি ইলেকট্রমিটার ; C হচ্ছে B বাল্‌বের ভিতরকার রূপার প্রলেপ।

বাল্‌বের মধ্যে উচ্চ বিভব প্রভেদ প্রয়োগ করা যায়। বাল্‌বের ভিতরকার গ্যাসের চাপ ইচ্ছামত নিয়ন্ত্রিত করা যায়। উৎস S থেকে নির্গত α-কণিকাগুলি বাল্‌বের গ্যাসের মধ্যে যে সমস্ত আয়নযুগল উৎপন্ন করে সেগুলি বিভব প্রভেদের প্রভাবে বাল্‌বের ভিতর দিকের রুপার প্রলেপ বা উৎসের ধাতব দণ্ড কর্তৃক আকৃষ্ট হয়ে একটি আয়নন প্রবাহ সৃষ্টি করে। এই আয়নন প্রবাহ বাল্‌বের রুপার প্রলেপের সংগে সংযুক্ত ইলেট্রমিটারের সাহায্যে পরিমাপ করা হয়।

বাল্বের ভিতরকার গ্যাসের চাপ পরিবর্তনের সংগে আয়নন প্রবাহ পরিবর্তনের লেখচিত্র (12·12) চিত্রে প্রদর্শিত হয়েছে। এই লেখচিত্র থেকে দেখা যায় যে উচ্চচাপে আয়নন প্রবাহ ধ্রুবক থাকে। একটি নির্দিষ্ট সংকট চাপ (Critical Pressure) $p_o$ অপেক্ষা নিম্নতর চাপে আয়নন প্রবাহ হ্রাস পেতে থাকে। এই নির্দিষ্ট সংকট চাপে α-কণিকাগুলির পথসীমা বাল্বের

চিত্র 12·12
গাইগার ও নাটাল কর্তৃক প্রাপ্ত চাপের সংগে আয়নন প্রবাহ পরিবর্তনের লেখচিত্র।

ব্যাসার্ধের সমান হয়। এর কারণ সহজেই বোঝা যায়। উচ্চতর চাপে যখন α-কণিকাগুলির পথসীমা বাল্বের ব্যাসার্ধ অপেক্ষা কম থাকে, তখন তাদের পক্ষে মোট যতগুলি আয়নযুগল সৃষ্টি করা সম্ভব তার সবগুলিই তারা বাল্বের ভিতরের গ্যাসের মধ্যে উৎপন্ন করে। এই অবস্থায় গ্যাসের চাপ হ্রাস করলেও উৎপন্ন আয়ন সংখ্যা অপরিবর্তিত থাকে ; ফলে আয়নন প্রবাহও অপরিবর্তিত থাকে। এখন গ্যাসের চাপ যদি কমিয়ে এমন করা হয় যে α-কণিকার পথসীমা বাল্বের ব্যাসার্ধ অপেক্ষা দীর্ঘতর হয়, তাহলে কণিকাগুলির ভ্রমণপথের একটা অংশ মাত্র বাল্বের মধ্যে অতিক্রান্ত হবে। ফলে উৎপন্ন আয়ন সংখ্যা পূর্বাপেক্ষা কম হয়। সুতরাং নিম্নতর চাপে আয়নন প্রবাহ কমতে থাকে। উপরে বর্ণিত পদ্ধতিতে বাল্বের ভিতরকার নির্দিষ্ট সংকট চাপে α-কণিকার পথসীমা পাওয়া যায়। যেহেতু পথসীমার মান গ্যাসের চাপের ব্যস্তানুপাতিক ($R \propto 1/p$), অতএব প্রমাণ বায়ুমণ্ডলীয় চাপে α-কণিকার পথসীমা সহজেই নির্ণয় করা যায়। সাধারণতঃ 76 সেমি চাপে এবং $15^{\circ}$ সে উষ্ণতায় বিশুদ্ধ বায়ুতে α-কণিকার পথসীমার মানকেই প্রমাণ পথসীমা (Standard Range) হিসাবে ধরা হয়।

পথসীমা পরিমাপের আর একটি বিকল্প পদ্ধতি হচ্ছে উৎস থেকে বিভিন্ন দূরত্বে α-কণিকার সংখ্যা নির্ণয় করা। নির্দিষ্ট প্রাথমিক শক্তি সম্পন্ন সমান্তরিত (Collimated) α-গুচ্ছের ক্ষেত্রে ভ্রমণপথের শেষ সীমা পর্য্যন্ত α-কণিকার সংখ্যা অপরিবর্তিত থাকে এবং তারপর এই সংখ্যা শূন্য হয়ে যায়। (12·13) চিত্রে দূরত্বের সঙ্গে α-সংখ্যার এইরূপ পরিবর্তনের লেখচিত্র দেখান হয়েছে। একে বলা হয় 'সমাকল পথসীমা লেখচিত্র' (Integral Range Curve)। হলোওয়ে এবং লিভিংষ্টন (Holloway and Livingston) এই পদ্ধতিতে বিভিন্ন α-গুচ্ছের পথসীমা খুব সঠিক ভাবে পরিমাপ করেন। (12·13) লেখচিত্রেও পথসীমার মানচ্যুতির নিদর্শন দেখা যায়।

চিত্র 12·13
উৎস থেকে পরিমিত দূরত্বের সংগে
α-সংখ্যা পরিবর্তনের লেখচিত্র।

α-কণিকার পথসীমার কয়েকটি বিকল্প সংজ্ঞা আছে। ইতিপূর্বে 'আয়নন বহির্ন্যস্ত পথসীমার' উল্লেখ করা হয়েছে। ব্র্যাগ আয়নন পদ্ধতিতে এই পথসীমা $R_i$ পরিমাপ করা হয়। অপরপক্ষে হলোওয়ে এবং লিভিংষ্টনের পদ্ধতিতে α-সংখ্যা এবং দূরত্বের যে লেখচিত্র আঁকা হয় তার নিম্নাভিমুখী অংশের নতি-পরিবর্তন বিন্দুতে অংকিত স্পর্শক $X$-অক্ষকে যে বিন্দুতে ছেদ করে সেই দূরত্বকে বলা হয় 'বহির্ন্যস্ত পথসীমা' $R_{ex}$ (Extrapolated Range)। এই লেখচিত্রে যে দূরত্বে α-সংখ্যা সর্বোচ্চ α-সংখ্যার অর্ধেক হয় তাকে বলা হয় 'গড় পথসীমা' $\overline{R}$ (Mean Range)। এই গড় পথসীমা $\overline{R}$ এমন হয় যে শতকরা পঞ্চাশ ভাগ α-কণিকার পথসীমা $\overline{R}$ অপেক্ষা বেশী হয়, বাকী পঞ্চাশ ভাগের পথসীমা $\overline{R}$ অপেক্ষা কম হয়।

নির্দিষ্ট প্রাথমিক শক্তি সম্পন্ন α-কণিকার ক্ষেত্রে এই তিন প্রকার পথসীমা অল্প পৃথক হয়। উদাহরণস্বরূপ $Po^{210}$ নিঃসৃত ($E_\alpha = 5{\cdot}3007$ সেমি) α-কণিকার ক্ষেত্রে $R_i = 3{\cdot}870$ সেমি, $R_{ex} = 3{\cdot}897$ সেমি এবং $\bar{R} = 3{\cdot}842$ সেমি হয়।

## 12.8 : পথসীমা এবং শক্তির মধ্যে সম্পর্ক

বিভিন্ন প্রাথমিক শক্তি সম্পন্ন α-কণিকার পথসীমা নির্ণয় করে $R$ পথসীমা এবং $E$ গতিশক্তির মধ্যে একটা গাণিতিক সম্পর্ক আবিষ্কার করা গেছে। এই সম্পর্কটি হচ্ছে

$$R = aE^{3/2} \qquad (12{\cdot}11)$$

$a$ একটি ধ্রুবক। যদি α-কণিকার বেগ হয় $v$, তাহলে যেহেতু $v \propto \sqrt{E}$, সুতরাং আমরা লিখতে পারি

$$R = bv^3 \qquad (12{\cdot}11a)$$

এখানে $b$ একটি ধ্রুবক। যদি পথসীমার একক হয় সেণ্টিমিটার এবং বেগের একক হয় সেমি/সেকেণ্ডে, তাহলে $b$ ধ্রুবকটির মান প্রায় $9{\cdot}6 \times 10^{-28}$ হয়। উপরের সম্পর্ক দুটিকে বলা হয় গাইগারের সূত্র (Geiger's Law)।

গাইগারের সূত্রের সাহায্যে যে কোন α-রশ্মিগুচ্ছের পথসীমা পরিমাপ করে তাদের প্রাথমিক গতিশক্তি নির্ণয় করা সম্ভব। সাধারণতঃ বিশেষ বিশেষ তেজস্ক্রিয় মৌল নিঃসৃত α-কণিকাগুলির প্রাথমিক গতিশক্তি চৌম্বক বর্ণালীলেখ যন্ত্রের সাহায্যে নির্ণয় করা হয়। পরে উপরে বর্ণিত কোন পদ্ধতিতে তাদের পথসীমা নির্ণয় করা হয়। এইভাবে গতিশক্তি এবং পথসীমার লেখচিত্র অংকন করা যায়। পথসীমা জানা থাকলে উক্ত লেখচিত্র থেকে গতিশক্তি পাওয়া সম্ভব। (12·1) সারণীতে কয়েকটি প্রাকৃতিক তেজস্ক্রিয় কেন্দ্রক-নিঃসৃত α-কণিকার শক্তি এবং গড় পথসীমার মান লিপিবদ্ধ করা হয়েছে। উক্ত সারণীর শেষ স্তম্ভে প্রদত্ত $R/E^{3/2}$ সংখ্যাটির মানগুলি থেকে গাইগারের সূত্র যে মোটামুটিভাবে সঠিক তা প্রতীয়মান হয়। উল্লেখযোগ্য যে গাইগারের সূত্র 3 থেকে 7 সেমি পথসীমার মধ্যে প্রায় সঠিক বলে ধরা যায়। নিম্নতর ও উচ্চতর বেগ সম্পন্ন α-কণিকার ক্ষেত্রে পথসীমা যথাক্রমে $v^{3/2}$ এবং $v^4$ এর সমানুপাতিক হয়।

**সারণী—12.1**

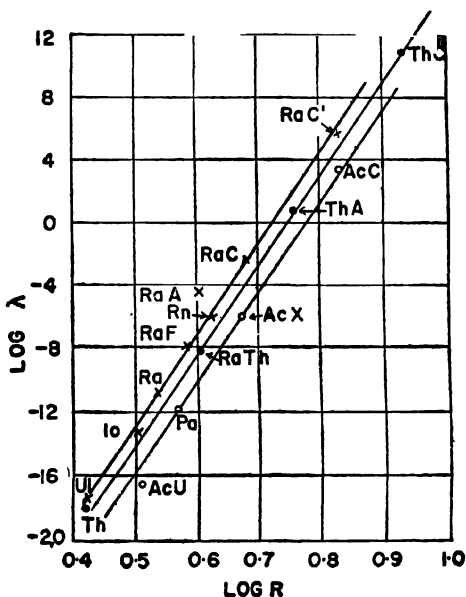
| তেজস্ক্রিয় কেন্দ্রক | α-শক্তি $E$ ( মি-ই-ভো ) | গড় পথসীমা $\bar{R}$ ( সেমি ) | $\bar{R}/E^{3/2}$ |
|---|---|---|---|
| $_{84}Po^{210}$(RaF) | 5·3007 | 3·842 | 0·315 |
| $_{86}Rn^{222}$ | 5·4861 | 4·051 | 0·315 |
| $_{84}Po^{218}$(RaA) | 5·9982 | 4·657 | 0·317 |
| $_{86}Rn^{220}$(ThEm) | 6·2823 | 5·004 | 0·318 |
| $_{86}Rn^{219}$(AcEm) | 6·542 | 5·240 | 0·313 |
| ” | 6·807 | 5·692 | 0·320 |
| $_{84}Po^{215}$(AcA) | 7·383 | 6·457 | 0·322 |
| $_{84}Po^{214}$(RaC′) | 7·6804 | 6·907 | 0·324 |
| ” | 8·2771 | 7·793 | 0·327 |
| $_{84}Po^{212}$(ThC′) | 8·7801 | 8·570 | 0·329 |
| $_{84}Po^{214}$(RaC′) | 9·0649 | 9·04 | 0·331 |
| $_{84}Po^{212}$(ThC′) | 9·4923 | 9·724 | 0·333 |
| ” | 10·5432 | 11·580 | 0·338 |

## 12.9 : গাইগার-নাটাল সূত্র

[illegible] পথসীমা পরিমাপ করে লক্ষ্য করেন যে দীর্ঘতর অর্ধজীবনকাল সম্পন্ন মৌলের ক্ষেত্রে নিঃসৃত α-কণিকাগুলির পথসীমা অপেক্ষাকৃত কম হয় ; অর্থাৎ এদের প্রাথমিক গতিশক্তি কম হয়। তাঁরা নির্দিষ্ট তেজস্ক্রিয় শ্রেণীর (Radioactive Series) ক্ষেত্রে পরীক্ষালব্ধ ফল থেকে λ বিঘটন-ধ্রুবক (Disintegration Constant) এবং $R$ পথসীমার মধ্যে নিম্নলিখিত গাণিতিক সম্পর্ক আবিষ্কার করেন ঃ

$$\log \lambda = A + B \log R \qquad (12·12)$$

$A$ এবং $B$ হচ্ছে দুটি ধ্রুবক। স্পষ্টতঃ log λ এবং log $R$ এর লেখচিত্র একটি সরলরেখা হবে, যার নতি (Slope) হবে $B$ ধ্রুবকটির সমান। বিভিন্ন তেজস্ক্রিয় শ্রেণীর ক্ষেত্রে সাধারণতঃ $B$ ধ্রুবকটির মান একই পাওয়া যায়,

যদিও $A$ ধ্রুবকটির মান ভিন্ন হয় ; অর্থাৎ বিভিন্ন তেজস্ক্রিয় শ্রেণীর ক্ষেত্রে সরলরেখা লেখচিত্রগুলি পরস্পরের সমান্তরাল হয় (12·14 চিত্র দ্রষ্টব্য )। এই

চিত্র 12·14
গাইগার-নাটাল সূত্র নির্দেশক লেখচিত্র।

লেখচিত্রগুলির সাহায্যে অনেক সময় নিঃসৃত $\alpha$-কণিকার পথসীমা নির্ণয় করে নিঃসারক মৌলের বিঘটন ধ্রুবক ($\lambda$) এবং তার থেকে অর্ধজীবনকাল ($\tau$) নির্ণয় করা যায়।

(12·11) সমীকরণ থেকে দেখা গেছে যে $\alpha$-কণিকার পথসীমা $R$ এর শক্তির উপর নির্ভরশীল ; $R \propto E^{3/2}$। সুতরাং (12·12) সমীকরণকে বিকল্পভাবে লেখা যায়

$$\log \lambda = C + D \log E \qquad (12{\cdot}12a)$$

এখানে $C$ এবং $D$ দুইটি ধ্রুবক।

এখানে উল্লেখযোগ্য যে যদিও বিভিন্ন তেজস্ক্রিয় মৌল থেকে নিঃসৃত $\alpha$-কণিকাগুলির পথসীমা মাত্র কয়েক সেমি পাল্লার মধ্যে নিবদ্ধ থাকে, মৌলগুলির

অর্ধজীবনকাল কিন্তু এক সেকেণ্ডের দশলক্ষ ভাগ ( বা আরও কম ) থেকে কয়েক শত কোটি বৎসর—এই বিশাল সীমার মধ্যে বিস্তৃত থাকে। উদাহরণস্বরূপ থোরিয়াম শ্রেণীর ক্ষেত্রে সর্বাপেক্ষা ক্ষণস্থায়ী এবং সর্বাপেক্ষা দীর্ঘস্থায়ী ThC′ এবং Th মৌল দুটির অর্ধজীবনকাল হচ্ছে যথাক্রমে $3 \times 10^{-7}$ সেকেণ্ড এবং $1{\cdot}39 \times 10^{10}$ বৎসর। অপরপক্ষে এই দুটি মৌল থেকে নিঃসৃত $\alpha$-কণিকাগুলির পথসীমা হচ্ছে যথাক্রমে 8·57 সেমি এবং 2·49 সেমি ; এদের প্রাথমিক গতিশক্তি হচ্ছে যথাক্রমে 8·95 মি-ই-ভো এবং 4·06 মি-ই-ভো। অর্থাৎ $\alpha$-শক্তির 2·24 গুণ বৃদ্ধির জন্য অর্ধজীবনকাল $10^{24}$ ভাগ কমে যায়।

এখানে উল্লেখযোগ্য গাইগার-নাটাল সূত্র খুব সঠিক একটি সূত্র নয়। বস্তুতঃ পরবর্তী যুগে আরও সঠিক ভাবে প্রযোজ্য সূত্রাবলী আবিষ্কৃত হয়েছে। উদাহরণস্বরূপ নির্দিষ্ট মৌলের ($Z =$ ধ্রুবক) বিভিন্ন আইসোটোপের $\log \lambda$ এবং এদের কেন্দ্রক নিঃসৃত $\alpha$-কণিকার বেগের বিপরীত সংখ্যার (Reciprocal) মধ্যে নির্দিষ্ট সম্পর্ক পাওয়া যায়। জোড়-জোড় ( প্রোটন সংখ্যা জোড়, নিউট্রন সংখ্যা জোড় ) কেন্দ্রকের ক্ষেত্রে এদের লেখচিত্র সরলরেখা হয়।

$\alpha$-কণিকার প্রাথমিক শক্তির সংগে নিঃসারক মৌলের অর্ধজীবনকাল পরিবর্তন আধুনিক কোয়ানটাম বলবিদ্যার সাহায্যে ব্যাখ্যা করা সম্ভব (12·15 অনুচ্ছেদ দ্রষ্টব্য )।

## 12.10 : পদার্থের মধ্যে $\alpha$-কণিকার শক্তিক্ষয়

আমরা ইতিপূর্বে দেখেছি যে পদার্থের মধ্য দিয়ে পরিভ্রমণ কালে $\alpha$-কণিকাগুলি পদার্থ মধ্যস্থ পরমাণু সমূহকে আয়নিত করার ফলে ক্রমাগত শক্তিক্ষয় করতে থাকে। বোর (N. Bohr), বেথে (H. Bethe), ব্লখ্ (F. Bloch), প্রমুখ বিজ্ঞানীগণ পদার্থের মধ্যে $\alpha$-কণিকার শক্তিক্ষয়ের হার নির্ণয় করার জন্য বিভিন্ন তত্ত্ব উদ্ভাবিত করেন।

যখন একটি $\alpha$-কণিকা বা ইলেকট্রনের তুলনায় ভারী অনুরূপ কোন কণিকা পরমাণু মধ্যস্থ একটি ইলেকট্রনের কাছ দিয়ে চলে যায়, তখন এই দুটি আহিত কণিকার মধ্যে একটা আকর্ষণী বল অল্পক্ষণের জন্য ক্রিয়া করে। এর ফলে ইলেকট্রনটি ক্ষণস্থায়ী সংঘাত (Impact) প্রাপ্ত হয়ে কিছু পরিমাণ ভরবেগ (Momentum) অর্জন করে। এই ভরবেগের মান নিরূপণ করে ইলেকট্রনটি

কতটা শক্তি অর্জন করে তা নির্ণয় করা যায়। এই শক্তি $\alpha$-কণিকার ভ্রমণপথ এবং ইলেকট্রনের মধ্যেকার দূরত্ব, অর্থাৎ 'সংঘাত-মাপের' (Impact Parameter) উপর নির্ভর করে। পরমাণুটিকে আয়নিত করতে হলে এই শক্তির মান পরমাণুর মধ্যে ইলেকট্রনের বন্ধনশক্তি অপেক্ষা উচ্চতর হওয়া প্রয়োজন। নির্দিষ্ট সীমা সম্পন্ন সংঘাত-মাপের ক্ষেত্রে নির্দিষ্ট পথ $dx$ অতিক্রম করতে $\alpha$-কণিকাটি যতগুলি পরমাণবিক ইলেকট্রনের সম্মুখীন হয়, তার সংগে প্রতিটি ইলেকট্রন কর্তৃক সংঘাতের ফলে অর্জিত শক্তি গুণ করে সমাকলন করলে, $\alpha$-কণিকার শক্তিক্ষয়-হার (Specific Energy Loss) $dE/dx$ নির্ণয় করা যায়।

একটি $ze$ আধান এবং $v$ বেগ সম্পন্ন কণিকা যখন কোন মাধ্যমের মধ্যে ভ্রমণ করে তখন তার শক্তিক্ষয় হার হয়

$$-\frac{dE}{dx}=\frac{4\pi z^2 e^4}{m_e v^2}\ nZ \ln \frac{2m_e v^2}{I} \qquad (12{\cdot}13)$$

এখানে $n$ হচ্ছে মাধ্যমের প্রতি একক আয়তনে বর্তমান পরমাণু সংখ্যা এবং $Z$ হচ্ছে মাধ্যমের পরমাণবিক সংখ্যা (Atomic Number)। অর্থাৎ $nZ$ হচ্ছে মাধ্যমের প্রতি একক আয়তনে বর্তমান ইলেকট্রন সংখ্যা। $m_e$ হচ্ছে ইলেকট্রনের ভর। $I$ হচ্ছে মাধ্যমের পরমাণবিক ইলেকট্রনের গড় আয়নন শক্তি। (12·13) সমীকরণ অপেক্ষাকৃত নিম্নতর শক্তি সম্পন্ন কণিকার ক্ষেত্রে প্রযোজ্য।

(12·13) সমীকরণ থেকে দেখা যায় যে শক্তিক্ষয় হার ভ্রমণশীল কণিকার ভর নিরপেক্ষ হয় এবং কণিকার বেগের বর্গের ব্যস্তানুপাতিক হয়। প্রকৃতপক্ষে কিন্তু শক্তিক্ষয় হার বেগের সংগে অপেক্ষাকৃত মন্থরতর হারে কমে। এর কারণ হচ্ছে (12·13) সমীকরণের লবে লগারিদ্‌ম পদে $v^2$ সংখ্যাটির উপস্থিতি। আবার যেহেতু $dE/dx \propto z^2$, অতএব সমবেগ সম্পন্ন বিভিন্ন কণিকার মধ্যে উচ্চতর আধান সম্পন্ন কণিকা দ্রুততর হারে শক্তিক্ষয় করে। উদাহণস্বরূপ $\alpha$-কণিকার শক্তিক্ষয় হার সমবেগ সম্পন্ন প্রোটনের শক্তিক্ষয় হারের চারগুণ বেশী হয়।

গড় আয়নন শক্তি $I$ মাধ্যমের পরমাণবিক সংখ্যা $Z$-এর উপর নির্ভর করে। পরমাণুর মধ্যে ইলেকট্রন বিতরণের ফের্মি-টমাস (Fermi-Thomas) সাংখ্যায়নিক প্রতিরূপের সাহায্যে ব্লখ্‌ (Felix Bloch) দেখান যে $I \propto Z$ হয়। পরীক্ষার দ্বারাও অনুরূপ সম্পর্ক পাওয়া যায়। অতএব (12·13)

সমীকরণ অনুযায়ী $dE/dx$ পরমাণবিক সংখ্যা $Z$ এর সঙ্গে একঘাত অপেক্ষা মন্থরতর হারে বৃদ্ধি পায়। পরীক্ষার দ্বারা দেখা যায় যে $dE/dx \propto \sqrt{A}$ হয়; $A$ হচ্ছে মাধ্যমের পরমাণবিক ভার। যেহেতু পরমাণবিক ভার $A$ পরমাণবিক সংখ্যা $Z$ এর প্রায় সমানুপাতিক, অতএব $dE/dx$ প্রায় $\sqrt{Z}$ এর সমানুপাতিক হয়। এই তথ্য তাত্ত্বিক ভিত্তিতে প্রাপ্ত উপরোক্ত সিদ্ধান্তের সংগে গুণগতভাবে সংগতিপূর্ণ।

উপরে আলোচিত শক্তিক্ষয়কে সাধারণতঃ আয়ননজনিত ক্ষয় (Ionization Loss) বা সংঘাতজনিত ক্ষয় (Collision Loss) বলা হয়। যদি কোন মাধ্যমে একটি আয়ন-যুগল সৃষ্টি করতে $\alpha$-কণিকার গড় শক্তিক্ষয় $w$ হয়, তাহলে আয়নন-ঘনত্ব $n(E)$ এবং শক্তিক্ষয় হারের মধ্যে নিম্নলিখিত সম্পর্কটি লেখা যায়ঃ

$$-\frac{dE}{dx} = wn(E)$$

$w$ সংখ্যাটি $\alpha$-বেগ নিরপেক্ষ হয়; কেবল মাধ্যমের প্রকৃতির উপর নির্ভর করে। অর্থাৎ নির্দিষ্ট মাধ্যমে $w$ ধ্রুবক হয়। এখানে উল্লেখযোগ্য যে $\alpha$-কণিকাগুলি মাধ্যমের পরমাণুগুলিকে শুধু আয়নিত করে না, সেগুলিকে উচ্চতর শক্তিস্তরে উত্তেজিতও করে; তাছাড়া আয়নিত পরমাণু থেকে নির্মুক্ত ইলেকট্রনের কিছু পরিমাণ গতিশক্তিও থাকে। এই সব কারণে মাধ্যমের আয়নন বিভবের তুলনায় $w$ অনেক বেশী হয়। বাতাসে $w$ এর মান প্রায় 35 ই-ভো হয়।

তাত্ত্বিক ভিত্তিতে দেখা যায় যে $\alpha$-সংঘাত দ্বারা আয়নিত পরমাণু থেকে নির্মুক্ত ইলেকট্রনের সর্বোচ্চ বেগ $\alpha$-কণিকার বেগের দ্বিগুণ হয়। মেঘকক্ষের সাহায্যে $\alpha$ ভ্রমণপথের আলোকচিত্র গ্রহণ করলে অনেক সময় তার থেকে যে সরু সরু সূতার মত আঁকাবাঁকা ক্ষীণ রেখা বেরিয়ে আসতে দেখা যায় তা হচ্ছে এইসব ইলেকট্রনের ভ্রমণপথ। এদের বলা হয় ডেলটা-রশ্মি ($\delta$-rays)।

(12·13) সমীকরণ অনুযায়ী শক্তিক্ষয় হার $dE/dx$ বেগ হ্রাসের সংগে দ্রুত বাড়তে থাকে। যেহেতু আয়নন-ঘনত্ব $n(E)$ হচ্ছে $dE/dx$ এর সমানুপাতিক, অতএব ভ্রমণশীল কণিকার বেগ হ্রাসের সংগে $n(E)$ সংখ্যাটিরও অনুরূপ বৃদ্ধি হওয়া উচিত। (12·9) চিত্রে প্রদর্শিত পরীক্ষালব্ধ আয়নন-ঘনত্ব পরিবর্তনের লেখচিত্রের সংগে এই সিদ্ধান্ত সংগতিপূর্ণ। উক্ত

চিত্রে দেখা যায় যে $\alpha$-উৎস থেকে দূরত্ব বৃদ্ধির সংগে, অর্থাৎ $\alpha$-কণিকার বেগ হ্রাসের সংগে আয়নন-ঘনত্ব বৃদ্ধি পায়।

উচ্চতর শক্তিতে শক্তিক্ষয় হার কমতে কমতে একটা প্রশস্ত ন্যূনতম মান প্রাপ্ত হয় ; তারপর খুব ধীরে বাড়তে থাকে। সাধারণতঃ $dE/dx$ যে শক্তিতে ন্যূনতম হয় তার মান ভ্রমণশীল কণিকার স্থির শক্তি (Rest Energy) $M_0c^2$ এর প্রায় তিনগুণ হয়।

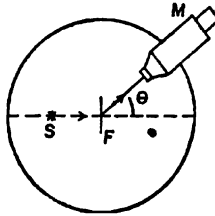
উপরে আলোচিত তত্ত্বে ধরে নেওয়া হয় যে $\alpha$-কণিকাগুলি বরাবরই $He^{++}$ আয়ন হিসাবে ভ্রমণ করে। প্রকৃতপক্ষে কিন্তু সংঘাত দ্বারা ইলেকট্রন উচ্ছিন্ন করা ছাড়াও $\alpha$-কণিকাগুলি মাঝে মাঝে পরমাণু থেকে ইলেকট্রন আহরণ করে এবং পরমুহূর্তে আবার ইলেকট্রন পরিত্যাগ করে। অর্থাৎ $\alpha$-কণিকাগুলি কখনও $He^{++}$, কখনও $He^{+}$, আবার কখনও আধানহীন He পরমাণু হিসাবে ভ্রমণ করে। সমগ্র ভ্রমণ পথে $\alpha$-কণিকাগুলি এইভাবে কয়েক সহস্রবার আধান পরিবর্তন করে। এর বেশীর ভাগই ঘটে শেষ কয়েক মিলিমিটারের মধ্যে। ভ্রমণপথের শতকরা 90 ভাগেই এরা $He^{++}$ হিসাবে থাকে।

## 12.11 : $\alpha$-কণিকার বিক্ষেপ ; রাদারফোর্ডের তত্ত্ব

পদার্থের মধ্য দিয়ে পরিভ্রমণকালে $\alpha$-কণিকাগুলি পরমাণবিক ইলেকট্রনের সংগে মাঝে মাঝে সংঘাত প্রাপ্ত হয়। এর ফলে তারা গতিপথ থেকে খুব সামান্য বিক্ষিপ্ত (Scattered) হয়। কারণ $\alpha$-কণিকাগুলি ইলেকট্রন অপেক্ষা বহু সহস্রগুণ ভারী। অবস্থাটা কতকটা একটি ভারী লোহার বল এবং কতকগুলি ছোট ছোট শোলার টুকরার মধ্যে সংঘাতের সংগে তুলনীয়। লোহার বলটি যদি খুব দ্রুত বেগে কতকগুলি ইতস্ততঃ অবস্থিত শোলার টুকরার মধ্য দিয়ে চলে যায়, বলটির গতিপথ প্রায় অবিচ্যুত থাকবে।

রাদারফোর্ড বিভিন্ন পদার্থের মধ্যে $\alpha$-কণিকার বিক্ষেপ নিয়ে পরীক্ষা করতে গিয়ে লক্ষ্য করেন যে যদিও বেশীর ভাগ $\alpha$-কণিকা গতিপথ থেকে খুব সামান্য বিচ্যুত হয়, মাঝে মাঝে এক একটি $\alpha$-কণিকা তাদের গতিপথ থেকে বহুল পরিমাণে বিক্ষিপ্ত হয়ে যায়। কোন কোন ক্ষেত্রে বিক্ষেপ কোণ $90^\circ$ অপেক্ষাও বেশী হতে দেখা যায়।

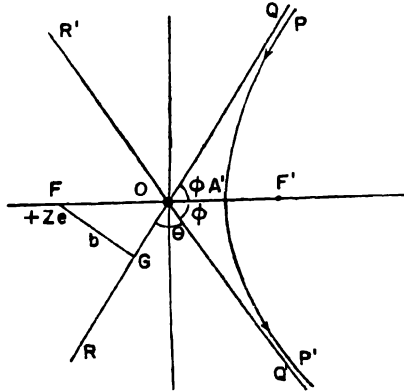
অল্প সংখ্যক $\alpha$-কণিকার এইরূপ উচ্চ কোণে বিক্ষেপ ব্যাখ্যা করবার জন্য রাদারফোর্ড অনুমান করেন যে পরমাণুর মধ্যে ধনাত্মক আধানবাহী অংশটি এর

কেন্দ্রস্থলে একটি অতি ক্ষুদ্রায়তন গোলকের মধ্যে নিবদ্ধ থাকে। পরমাণুর প্রায় সমগ্র ভরও এই গোলকের মধ্যে নিহিত থাকে। এই ধনাত্মক আধানবাহী ভারী কেন্দ্রীয় অংশকে বলা হয়, 'কেন্দ্রক' (Nucleus)। $\alpha$-কণিকাগুলি যখন কেন্দ্রকের খুব সন্নিকটবর্তী পথ দিয়ে ভ্রমণ করে তখন এইরূপ বিন্দুসদৃশ গুরুভার কেন্দ্রকের উচ্চ ধনাত্মক আধানের জন্য তাদের উপর যে স্থিরতাড়িত বিকর্ষণী বল (Electrostatic Repulsive Force) ক্রিয়া করে তারই প্রভাবে তারা উচ্চকোণে বিক্ষিপ্ত হয়। কারণ এক্ষেত্রে $\alpha$-কণিকাগুলির উপর ক্রিয়াশীল বিকর্ষণী বল খুব তীব্র হয়। তৎকালীন প্রচলিত টমসন প্রতিরূপের (Thomson Model) সাহায্যে এই প্রকার উচ্চকোণে বিক্ষেপ ব্যাখ্যা করা সম্ভব নয়। কারণ এই প্রতিরূপ অনুযায়ী পরমাণুর ধনাত্মক আধান এর সমগ্র দেহে, অর্থাৎ প্রায় $10^{-8}$ সেমি ব্যাসার্ধ সম্পন্ন পরমাণু গোলকের মধ্যে পরিব্যাপ্ত থাকে। যখন $\alpha$-কণিকা তার ভ্রমণপথে এই গোলকের কেন্দ্রের খুব সন্নিকটে আসে তখন এর উপর বিকর্ষণী বল ক্রিয়া করে কেবল পরমাণুর ধনাত্মক আধানের সেই অংশের জন্য যা এর সংঘাত মাপের (Impact Parameter) সমান ব্যাসার্ধ সম্পন্ন গোলকের মধ্যে নিহিত থাকে। স্পষ্টতঃ এই বল খুব ক্ষীণ হয়। সুতরাং রাদারফোর্ড তত্ত্ব প্রকাশিত হবার পর টমসন প্রতিরূপ সম্পূর্ণভাবে

চিত্র 12·15

$\alpha$-বিক্ষেপ উৎপাদনের মূল পরীক্ষা ব্যবস্থা। S হচ্ছে $\alpha$-উৎস, F হচ্ছে বিক্ষেপক এবং M হচ্ছে চমক উৎপাদক পর্দা সম্বলিত অণুবীক্ষণ যন্ত্র।

পরিত্যক্ত হয় (3·2 অনুচ্ছেদ দ্রষ্টব্য)। রাদারফোর্ড কল্পিত প্রতিরূপ অনুযায়ী পরমাণু মধ্যস্থ ইলেকট্রনগুলি এর কেন্দ্র থেকে প্রায় $10^{-8}$ সেমি দূরে থেকে বিভিন্ন কক্ষপথে আবর্তন করতে থাকে। রাদারফোর্ড প্রতিরূপ সম্বন্ধে ইতিপূর্বে (3·3) অনুচ্ছেদে আলোচনা করা হয়েছে।

সাধারণতঃ বিক্ষেপ পরীক্ষা করার সময় একগুচ্ছ সমান্তরিত সমশক্তি সম্পন্ন $\alpha$-কণিকাকে একটি খুব পাতলা ধাতব পাতের উপরে আপতিত করা হয়। সোনা ($Z=79$) রুপা ($Z=47$) প্রভৃতি ধাতুকে পিটিয়ে $10^{-5}$ সেমি বা আরও কম বেধ সম্পন্ন পাতে পরিণত করা যায়। পাতটি খুব পাতলা হওয়ার জন্য এর মধ্যে পরিভ্রমণকালে $\alpha$-কণিকাগুলির বিশেষ শক্তিক্ষয় হয় না। বিভিন্ন দিকে বিক্ষিপ্ত কণিকাগুলির সংখ্যা গণনা করার জন্য প্রয়োজন মত ব্যবস্থা অবলম্বন করা হয়। (12·15) চিত্রে $\alpha$-বিক্ষেপ পরীক্ষার মূল ব্যবস্থার একটি নকশা প্রদর্শিত হয়েছে।

(12·16) চিত্রে $\alpha$-কণিকার ভ্রমণপথ $PA'P'$ প্রদর্শিত হয়েছে। এই ভ্রমণপথ পরাবৃত্তাকার (Hyperbolic) হয়। রাদারফোর্ডের মতবাদ

চিত্র 12·16

বিক্ষেপ কালে $\alpha$-কণিকার ভ্রমণপথ।

অনুযায়ী যদি ধরা যায় যে অসীম ভর সম্পন্ন একটি পরমাণুর সমগ্র ধনাত্মক আধান $+Ze$ ( $Z=$ পরমাণবিক সংখ্যা ) একটি বিন্দুতে কেন্দ্রীভূত থাকে, তাহলে সহজেই দেখান যায় যে এই (F) বিন্দুটি পরাবৃত্তের অন্যতম ফোকাসে অবস্থিত থাকে। যদি $\alpha$-কণিকাটির ভর $M$ এবং আধান $+Z'e$ হয়, তাহলে স্পষ্টতঃ $Z'=2$ হবে। আবার যদি $v$ হয় $\alpha$-কণিকাটির প্রাথমিক বেগ তাহলে এর প্রাথমিক গতিশক্তি $E_\alpha=\frac{1}{2}Mv^2$ হবে।

যখন $\alpha$-কণিকাটি কেন্দ্রক F থেকে অসীম দূরত্বে থাকে তখন এর উপর কেন্দ্রকের বিকর্ষণ জনিত বল উপেক্ষা করা যায়। সেক্ষেত্রে $\alpha$-কণিকার কোন

স্থিতিশক্তি থাকে না ; মোট শক্তি এর প্রাথমিক গতিশক্তির সমান হয়। এই অবস্থায় $\alpha$-কণিকাটি সরলরেখা পথে পরিভ্রমণ করে এবং PA′P′ পরাবৃত্তটির A′P অংশটির অসীমের দিকে বর্ধিতাংশ অর্থাৎ $\alpha$-কণিকার আগমনের অসীমপথ (Asymptote) QOR সরলরেখার সংগে সমাপতিত (Coincident) বলে ধরা যেতে পারে। কেন্দ্রক F থেকে QOR সরলরেখার উপর যদি FG লম্ব অংকিত করা যায়, তাহলে FGকে বলা যায় 'সংঘাত-মাপ' (Impact Parameter)। এই সংঘাত-মাপের মান $b$ ধরা যাক।

কেন্দ্রকের দিকে $\alpha$-কণিকাটি যত অগ্রসর হতে থাকে, তত এর উপর কেন্দ্রকের আধান জনিত ক্রমবর্ধমান বিকর্ষণী বল ক্রিয়া করতে থাকে। ফলে এর ভ্রমণপথ বাইরের দিকে বক্র হয়ে যেতে থাকে। অবশেষে যখন F থেকে ন্যূনতম দূরত্বে অবস্থিত A′ বিন্দুতে $\alpha$-কণিকাটি উপস্থিত হয়, তখন কেন্দ্রকের বিকর্ষণী বলের প্রভাবে সেটি আবার A′P′ রেখা ধরে ক্রমশঃ দূরে সরে যেতে থাকে। অসীম দূরত্বে এই রেখাটি R′OQ′ সরলরেখার সংগে সমাপতিত হয়। স্পষ্টতঃ $\alpha$-কণিকার আগমনের অসীমপথ (Asymptote) QOR এবং অপসরণের অসীমপথ R′OQ′ সরলরেখা দুটির অন্তর্গত কোণ $\theta$ হচ্ছে $\alpha$-কণিকার বিক্ষেপ কোণ। QO এবং OQ′ সরলরেখা দুটি পরাবৃত্তের অক্ষের সংগে সমান কোণে ($\phi$) আনত থাকে। $\alpha$-কণিকাটি যখন A′ বিন্দুতে উপস্থিত হয় তখন এর উপর কেন্দ্রকের কুলম্ব বিকর্ষণী বল উচ্চতম হয়। যদি F থেকে A′ বিন্দুর দূরত্ব হয় $q$, তাহলে A′ বিন্দুতে $\alpha$-কণিকার স্থিতিশক্তি হয়

$$V = \frac{ZZ'e^2}{q}$$

এই বিন্দুতে $\alpha$-কণিকার বেগ যদি হয় $v_m$, তাহলে এর গতিশক্তি হয়

$$E_k = \tfrac{1}{2}Mv_m^2$$

সুতরাং A′ বিন্দুতে $\alpha$-কণিকার মোট শক্তি হয়

$$E_k + V = \tfrac{1}{2}Mv_m^2 + \frac{ZZ'e^2}{q}$$

শক্তি-সংরক্ষণ সূত্র অনুযায়ী এই শক্তি $\alpha$-কণিকার প্রাথমিক গতিশক্তির ($E_a$) সমান হওয়া উচিত ; অর্থাৎ

$$E_\alpha = \tfrac{1}{2}Mv^2 = \tfrac{1}{2}Mv_m{}^2 + \frac{ZZ'e^2}{q} \qquad (12\cdot14)$$

আবার অসীম দূরত্বে α-কণিকার ভরবেগ $Mv$ হয়। এই ভরবেগ QOR সরলরেখা অভিমুখী। সুতরাং কেন্দ্রককে বেষ্টন করে α-কণিকার প্রাথমিক কৌণিক ভরবেগ (Angular Momentum) হবে

$$Mv.\,FG = Mv.\,b$$

A′ বিন্দুতে α-কণিকার ভরবেগ $Mv_m$ হচ্ছে FF′ অক্ষের লম্ব অভিমুখী। সুতরাং কেন্দ্রককে বেষ্টন করে A′ বিন্দুতে α-কণিকার কৌণিক ভরবেগ হবে

$$Mv_m.\,FA' = Mv_m.\,q$$

α-কণিকাটির উপর যে বল ক্রিয়া করে তা হচ্ছে কৈন্দ্রিক বল (Central Force)। এইরূপ বলের ক্রিয়ায় গতিশীল কণিকার কৌণিক ভরবেগ সংরক্ষিত হয় ; সুতরাং কৌণিক ভরবেগ সংরক্ষণ সূত্র (Conservation of Angular Momentum) অনুযায়ী লেখা যায়

$$Mvb = Mv_mq \qquad (12\cdot15)$$

সমীকরণ (12·14) থেকে পাওয়া যায়

$$\frac{v_m{}^2}{v^2} = 1 - \frac{2ZZ'e^2}{Mv^2q} \qquad (12\cdot14a)$$

বলবিদ্যার তত্ত্ব থেকে জানা যায় যে যদি কোন কণিকার উপর দূরত্বের বর্গের ব্যস্তানুপাতে পরিবর্তনশীল কৈন্দ্রিক বল ক্রিয়া করে, তাহলে কণিকাটির ভ্রমণপথ একটি কনিক্ হয়। যেহেতু α-কণিকাটির প্রাথমিক শক্তি ধনাত্মক, অতএব এই কনিক্ পরাবৃত্তাকার (Hyperbolic) হয়। (12·16) চিত্র থেকে দেখা যায় যে

$$OF = OF' = \varepsilon.OA'$$

$\varepsilon > 1$ হচ্ছে পরাবৃত্তের উৎকেন্দ্রতা (Eccentricity)। সুতরাং

$$q = FA' = OF + OA' = OF(1 + 1/\varepsilon)$$

আবার কনিক্‌স্ (Conics) তত্ত্ব থেকে পাওয়া যায়

$$1/\varepsilon = \cos\phi$$

সুতরাং $$q = OF(1 + \cos\phi)$$

যেহেতু $\sin\phi = FG/OF$, অতএব

$$q = FG.\frac{1+\cos\phi}{\sin\phi} = b\cdot\frac{1+\cos\phi}{\sin\phi} \qquad (12\cdot16)$$

সমীকরণ (12·15) এবং (12·16) থেকে পাওয়া যায়

$$\frac{b}{q} = \frac{v_m}{v} = \frac{\sin\phi}{1+\cos\phi} \qquad (12\cdot17)$$

সমীকরণ (12·14$a$) এবং (12·17) থেকে পাওয়া যায়

$$1 - \frac{2ZZ'e^2}{Mv^2q} = \frac{\sin^2\phi}{(1+\cos\phi)^2} = \frac{1-\cos\phi}{1+\cos\phi}$$

$$\text{সুতরাং } 1 - \frac{2ZZ'e^2}{Mv^2b}\cdot\frac{\sin\phi}{1+\cos\phi} = \frac{1-\cos\phi}{1+\cos\phi}$$

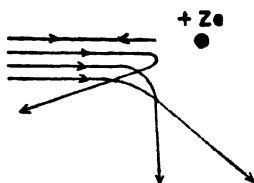
এর থেকে পাওয়া যায়

$$b = \frac{ZZ'e^2}{Mv^2}\tan\phi$$

আবার যেহেতু $\theta + 2\phi = \pi$, অতএব $\phi = \pi/2 - \theta/2$ ; সুতরাং

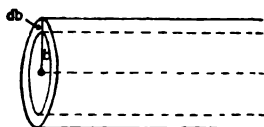
$$b = \frac{ZZ'e^2}{Mv^2}\cot\frac{\theta}{2} \qquad (12\cdot18)$$

সমীকরণ (12·18) থেকে দেখা যায় যে সংঘাত-মাপ (Impact Para-

চিত্র 12·17

বিভিন্ন সংঘাত দূরত্বে $\alpha$-বিক্ষেপ।

meter) যত ক্ষুদ্র হয়, বিক্ষেপ কোণ (Scattering Angle) $\theta$ তত বৃহত্তর হয়। (12·17) চিত্রে বিভিন্ন সংঘাত-মাপে আপতিত $\alpha$-কণিকাগুলির বিক্ষেপের একটি সরল নকশা দেখান হয়েছে। সংঘাত-মাপ $b$ যত কম হয়,

$\alpha$-কণিকাটি কেন্দ্রকের তত নিকটে আসতে সক্ষম হয় ; ফলে এর উপরে ক্রিয়াশীল বিকর্ষণী বলও তত প্রখরতর হয়, এবং $\alpha$-কণিকাটি বৃহত্তর কোণে বিক্ষিপ্ত হয়।

পরীক্ষাকালে বিপুল সংখ্যক $\alpha$-কণিকা নিয়ে পরীক্ষা করা হয়। যদি একটি বিশেষ কেন্দ্রকের উপর দৃষ্টি নিবদ্ধ রাখা হয়, তাহলে উক্ত কেন্দ্রক থেকে বিভিন্ন $\alpha$-কণিকার আগমনের অসীমপথগুলির (Asymptotic Paths) দূরত্ব বিভিন্ন হবে। এই দূরত্বগুলিই হচ্ছে সংঘাত-মাপ ($b$)। এখন যদি $\alpha$-কণিকাগুলির আগমনের অসীমপথের সমান্তরাল অক্ষ বিশিষ্ট এবং $b$ ও $b+db$ ব্যাসার্ধ সম্পন্ন দুটি অসীম দৈর্ঘ্যের সমাক্ষীয় বেলন (Cylinder) আঁকা যায়, এবং আলোচ্য কেন্দ্রকটি বেলন-অক্ষের উপরে অবস্থিত থাকে, তাহলে বেলন দুটির অন্তর্বর্তী বলয়াকৃতি (Annular)

চিত্র 12·18

বিক্ষিপ্ত $\alpha$-কণিকার সংখ্যা নিরূপণ।

অঞ্চলের মধ্য দিয়ে আগত $\alpha$-কণিকাগুলি $\theta$ এবং $\theta-d\theta$ এই দুটি কৌণিক সীমার মধ্যে বিক্ষিপ্ত হবে ( 12·18 চিত্র দ্রষ্টব্য )। বেলন অক্ষের অভিলম্বে অবস্থিত একটি সমতলের উপরে উপরোক্ত বলয়াকৃতি অঞ্চলের প্রস্থচ্ছেদের ক্ষেত্রফল $2\pi b db$ হবে। যদি বিক্ষেপকের (Scatter) প্রতি একক ক্ষেত্রফলের উপরে $N$ সংখ্যক $\alpha$-কণিকা আপতিত হয়, তাহলে উপরোক্ত ক্ষেত্রফলের উপর আপতিত $\alpha$-কণিকার সংখ্যা $N.2\pi b db$ হবে। (12·18) সমীকরণ অনুযায়ী এই সংখ্যা হবে

$$dN = N.2\pi b db$$

$$= -\pi N\left(\frac{ZZ'e^2}{Mv^2}\right)^2 \operatorname{cosec}^3\frac{\theta}{2}\cos\frac{\theta}{2}\,d\theta \qquad (12·19)$$

স্পষ্টতঃ এই $\alpha$-কণিকাগুলি $\theta$ এবং $\theta - d\theta$ কৌণিক সীমার মধ্যে $d\Omega$ ঘনকোণে (Solid Angle) বিক্ষিপ্ত হয় ; এখানে

$$d\Omega = 2\pi \ \sin\theta d\theta = 4\pi \ \sin\frac{\theta}{2}\cos\frac{\theta}{2}\, d\theta$$

সুতরাং প্রতি একক ঘনকোণের মধ্যে বিক্ষিপ্ত $\alpha$-কণিকার সংখ্যা হবে ($\because \quad Z'=2$)

$$\frac{dN}{d\Omega} = N.\left(\frac{Ze^2}{Mv^2}\right)^2 \text{cosec}^4 \ \frac{\theta}{2} \qquad (12\cdot20)$$

(12·20) সমীকরণ প্রতিপন্ন করার সময়ে (12·19) সমীকরণের ডান দিকের ঋণাত্মক চিহ্ন উপেক্ষা করা হয়েছে। এই ঋণাত্মক চিহ্নের উদ্ভব হয় সমীকরণ (12·18) অনুযায়ী প্রাপ্ত $b$ সংখ্যাটিকে অবকলন (Differentiate) করার সময়। $b$ যত বৃদ্ধি পায় বিক্ষেপ কোণ $\theta$ তত হ্রাস পায় ; অর্থাৎ $db$ ধনাত্মক হলে $d\theta$ ঋণাত্মক হয়। সুতরাং উপরোক্ত ঋণাত্মক চিহ্নটি উপেক্ষা করলে কোন ভুল হয় না।

(12·20) সমীকরণ প্রতিপন্ন করার সময়ে ধরা হয় যে বিক্ষপকের প্রতি একক ক্ষেত্রফলে $N$ সংখ্যক $\alpha$-কণিকা আপতিত হয় এবং একটি মাত্র কেন্দ্রকের প্রভাবে বিক্ষেপ সংঘটিত হয়। যদি প্রতি একক ক্ষেত্রফলে আপতিত $\alpha$-কণিকার সংখ্যা হয় $N=1$, তাহলে (12·20) সমীকরণ থেকে একটি মাত্র কেন্দ্রকের প্রভাবে উক্ত কণিকাটির $\theta$ কোণে প্রতি একক ঘনকোণের মধ্যে বিক্ষিপ্ত হবার সম্ভাব্যতা (Probability) পাওয়া যায়। এই সম্ভাব্যতাকে যদি $d\sigma/d\Omega$ চিহ্ন দ্বারা নির্দেশিত করা হয়, তাহলে আমরা পাই

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \left(\frac{Ze^2}{Mv^2}\right)^2 \text{cosec}^4 \ \frac{\theta}{2} \qquad (12\cdot21)$$

(12·21) সমীকরণকে বলা হয় রাদারফোর্ড বিক্ষেপ ফর্মুলা (Rutherford Scattering Formula)।

এখানে উল্লেখযোগ্য যে যেহেতু $r$ দূরত্বে কেন্দ্রকের আধান জনিত বিকর্ষণী বলের প্রভাবে $\alpha$-কণিকার স্থিতিশক্তি হয় $ZZ'e^2/r$, অতএব $Ze^2$ সংখ্যাটি শক্তি এবং দৈর্ঘ্যের গুণফলের সংগে সমমাত্রা (Dimension) সম্পন্ন হয়। আবার $Mv^2$ সংখ্যাটি শক্তির সমমাত্রিক হয়। সুতরাং $(Ze^2/Mv^2)$ দৈর্ঘ্যের

সমমাত্রিক হয়। অতএব (12·21) সমীকরণে $(d\sigma/d\Omega)$ সংখ্যাটি দৈর্ঘ্যের বর্গের অর্থাৎ ক্ষেত্রফলের সংগে সমমাত্রা সম্পন্ন হয়। সেইজন্য বিক্ষেপের সম্ভাব্যতা (Probabilily of Scattering) নির্দেশক এই সংখ্যাটিকে 'প্রস্থচ্ছেদ' (Cross Section) আখ্যা দেওয়া হয়। বস্তুতঃ $(d\sigma/d\Omega)$ সংখ্যাটিকে বলা হয় 'অবকল বিক্ষেপ প্রস্থচ্ছেদ' (Differential Scattering Cross Section)। যেহেতু ঘনকোণ $d\Omega$ শূন্য মাত্রা সম্পন্ন হয়, সুতরাং $d\sigma$ সংখ্যাটিও ক্ষেত্রফলের সংগে সমমাত্রিক হয়। $d\sigma$-কে বলা যায় $d\Omega$ ঘনকোণের মধ্যে 'বিক্ষেপ প্রস্থচ্ছেদ'। অর্থাৎ $d\Omega$ ঘনকোণের মধ্যে একটি $\alpha$-কণিকার বিক্ষিপ্ত হবার সম্ভাব্যতা নির্দেশিত হয় $d\sigma$ সংখ্যাটির দ্বারা। $d\sigma$-কে সমাকলন (Integrate) করার ফলে প্রাপ্ত $\sigma$ সংখ্যাটিকে বলা যায় 'মোট বিক্ষেপ প্রস্থচ্ছেদ' (Total Scattering Cross Section)।

(12·20) এবং (12·21) সমীকরণ থেকে দেখা যায় যে যদি বিক্ষেপকের প্রতি একক ক্ষেত্রফলের উপর $N_1$ সংখ্যক $\alpha$-কণিকা আপতিত হয়, তাহলে একটি মাত্র কেন্দ্রকের প্রভাবে $d\Omega$ ঘনকোণের মধ্যে বিক্ষিপ্ত $\alpha$-কণিকার সংখ্যা হবে

$$dN_1 = N_1 d\sigma = N_1 \left(\frac{Ze^2}{Mv^2}\right)^2 \operatorname{cosec}^4 \frac{\theta}{2} d\Omega$$

যদি পরীক্ষাধীন পাতটির মধ্যে মোট $N'$ সংখ্যক বিক্ষেপক কেন্দ্রক বর্তমান থাকে, তাহলে বিক্ষিপ্ত $\alpha$-কণিকার সংখ্যা হবে

$$dN = N_1 N' d\sigma = N_1 N' \left(\frac{Zc^2}{Mv^2}\right)^2 \operatorname{cosec}^4 \frac{\theta}{2} d\Omega$$

এখন বিক্ষেপক পাতটির ক্ষেত্রফল যদি $A$ হয়, এবং এর উপর আপতিত মোট $\alpha$-কণিকার সংখ্যা $N$ হয়, তাহলে স্পষ্টতঃ $N_1 = N/A$ হয়। আবার যদি ধাতব পাতটির প্রতি একক ক্ষেত্রফলের মধ্যে $n_1$ সংখ্যক বিক্ষেপক কেন্দ্রক বর্তমান থাকে, তাহলে লেখা যায়

$$N_1 N' = \frac{N}{A} N' = N . \frac{N'}{A} = N n_1$$

সুতরাং আমরা পাই

$$dN = Nn_1 \left(\frac{Ze^2}{Mv^2}\right)^2 \text{cosec}^4 \frac{\theta}{2} d\Omega$$

$$= Nn_1 d\sigma \tag{12·22}$$

(12·22) সমীকরণ থেকে বিক্ষেপ প্রস্থচ্ছেদের সংজ্ঞা পাওয়া যায়। যদি $N=1$ এবং $n_1=1$ হয়, তাহলে আমরা পাই $dN=d\sigma$ ; অর্থাৎ যদি একটি মাত্র α-কণিকা এমন একটি বিক্ষেপক পাতের উপরে আপতিত হয়, যার মধ্যে প্রতি একক ক্ষেত্রফলে একটি মাত্র কেন্দ্রক থাকে, তাহলে α-কণিকাটির বিক্ষেপের সম্ভাব্যতা $d\sigma$ হবে।

যদি বিক্ষেপক পাতটির বেধ হয় $t$ এবং এর মধ্যে প্রতি একক আয়তনে $n$ সংখ্যক বিক্ষেপক কেন্দ্রক থাকে, তাহলে পাতটির একক ক্ষেত্রফলে বর্তমান বিক্ষেপক কেন্দ্রকের সংখ্যা হবে

$$n_1 = nt$$

এখন যদি বিক্ষেপক কেন্দ্রক থেকে θ এবং $\theta+\Delta\theta$ অর্ধশীর্ষ কোণ বিশিষ্ট দুটি শংকু (Cone) অংকিত করা যায়, তাহলে এই দুটি শংকুর অন্তর্গত ঘন-কোণের মান হবে

$$\Delta\Omega = 2\pi \sin\theta\, \Delta\theta$$

সুতরাং θ এবং $\theta+\Delta\theta$ কোণদ্বয়ের মধ্যে বিক্ষিপ্ত α-কণিকার মোট সংখ্যা হবে

$$\Delta N = 2\pi Nnt \left(\frac{Ze^2}{Mv^2}\right)^2 \frac{\sin\theta\, \Delta\theta}{\sin^4 \frac{\theta}{2}}$$

যদি উপরোক্ত শংকুদ্বয়ের অন্তর্বর্তী স্থানে একক ক্ষেত্রফল বিশিষ্ট একটি α-নির্দেশক (Detector) বিক্ষেপ-কেন্দ্র থেকে $r$ দূরত্বে রাখা থাকে, তাহলে উক্ত নির্দেশকের উপরে আপতিত α-কণিকার সংখ্যা হবে

$$N_s = \frac{\Delta N}{2\pi r^2 \sin\theta\, \Delta\theta}$$

$$= \frac{Nnt}{r^2} \left(\frac{Ze^2}{Mv^2}\right)^2 \text{cosec}^4 \frac{\theta}{2} \tag{12·23}$$

## 12.12 : গাইগার এবং মার্সডেনের পরীক্ষা

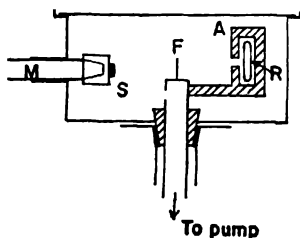
(12·23) সমীকরণ থেকে পাওয়া যায়

(ক) $N_s \propto \dfrac{1}{\sin^4 \theta/2}$

(খ) $N_s \propto t$

(গ) $N_s \propto 1/E^2$, ($E = \frac{1}{2}Mv^2$ হচ্ছে $\alpha$-কণিকাগুলির শক্তি )

(ঘ) $N_s \propto Z^2$

উপরোক্ত সিদ্ধান্তগুলির প্রত্যেকটি যদি পরীক্ষার দ্বারা সমর্থিত হয়, তাহলে রাদারফোর্ড উদ্ভাবিত পরমাণুর কেন্দ্রকীয় প্রতিরূপের সত্যতা প্রতিষ্ঠিত

চিত্র 12·19

$\alpha$-কণিকা বিক্ষেপ নিরীক্ষণের জন্য গাইগার ও মার্সডেন কর্তৃক উদ্ভাবিত পরীক্ষা ব্যবস্থা।

হতে পারে। গাইগার এবং মার্সডেন (Geiger and Marsden) নামক বিজ্ঞানীদ্বয় নিম্নে বর্ণিত পরীক্ষার সাহায্যে উপরোক্ত সিদ্ধান্তগুলি প্রমাণিত করেন।

(12·19) চিত্রে তাঁদের পরীক্ষা পদ্ধতি প্রদর্শিত হয়েছে। F একটি খুব পাতলা সোনা বা রুপার পাত। R একটি পাতলা আবদ্ধ কাঁচনল, যার মধ্যস্থিত রেডন ($Rn^{222}$) গ্যাস থাকে $\alpha$-কণিকা নিঃসৃত হয়ে A পর্দার মধ্যেকার ছিদ্র পার হয়ে সমান্তরিত রশ্মিগুচ্ছ সৃষ্টি করে। এই রশ্মিগুচ্ছ F পাতের উপরে আপতিত হবার ফলে বিভিন্ন দিকে বিক্ষিপ্ত হয়। $\theta$ কোণে বিক্ষিপ্ত $\alpha$-কণিকাগুলি S চমক-উৎপাদক পর্দার উপরে আপতিত হয়ে দীপ্তির চমক (Scintillation) উৎপন্ন করে। S পর্দার ঠিক পিছনে স্থাপিত M অণুবীক্ষণের সাহায্যে এইসব দীপ্তির চমক নিরীক্ষণ করা যায় এবং তাদের

সংখ্যা গণনা করা যায়। S পর্দা সহ M অণুবীক্ষণটিকে F পাতের সংলগ্ন একটি কাল্পনিক উল্লম্ব (Vertical) অক্ষ বেষ্টন করে আবর্তিত করান যায়। এই ব্যবস্থার দ্বারা বিভিন্ন কোণে বিক্ষেপের ফলে S পর্দার উপরে আপতিত $\alpha$-কণিকাগুলি কর্তৃক উৎপন্ন দীপ্তির চমক নিরীক্ষণ করা সম্ভব। এইরূপ চমকের সংখ্যা গণনা করে S পর্দার প্রতি একক ক্ষেত্রফলের উপর আপতিত $\alpha$-কণিকার সংখ্যা নিরূপণ করা যায়। সমগ্র যান্ত্রিক ব্যবস্থাটি একটি খুব নিম্ন বায়ুচাপ সম্পন্ন আধারের মধ্যে অবস্থিত থাকে। গাইগার এবং মার্সডেনের পরীক্ষা থেকে দেখা যায় যে নির্দিষ্ট উৎস থেকে নিঃসৃত সমশক্তি সম্পন্ন ($v=$ ধ্রুবক) $\alpha$-কণিকাগুলি যখন নির্দিষ্ট বেধ সম্পন্ন ($t=$ ধ্রুবক) পাত কর্তৃক বিক্ষিপ্ত হয়, তখন চমক-উৎপাদক পর্দার একক ক্ষেত্রফলের উপরে আপতিত বিক্ষিপ্ত $\alpha$-কণিকার সংখ্যা $N_s$ এবং $\sin^4\frac{\theta}{2}$ সংখ্যা দুটির গুণফল ধ্রুবক হয়।

এই তথ্য উপরোক্ত (ক) সিদ্ধান্তের সংগে সংগতিপূর্ণ।

(12·2) সারণীর শেষ স্তম্ভে এই গুণফলগুলি লিপিবদ্ধ করা হয়েছে। এই সারণী থেকে দেখা যায় যে পরীক্ষার ত্রুটি সীমার মধ্যে উপরোক্ত গুণফলগুলি প্রায় সমান হয়।

**সারণী—12·2**

| বিক্ষেপ কোণ $\theta$ | $\sin^4\frac{\theta}{2}$ | চমক উৎপাদক পর্দার উপরে আপতিত $\alpha$-কণিকার সংখ্যা ($N_s'$) | $N_s' \times \sin^4\frac{\theta}{2}$ |
|---|---|---|---|
| 15° | $2.903\times10^{-4}$ | 132,000 | 38·4 |
| 30° | $4.484\times10^{-3}$ | 7800 | 35·0 |
| 45° | $2.146\times10^{-2}$ | 1435 | 30·8 |
| 60° | ·0625 | 477 | 29·8 |
| 75° | ·1379 | 211 | 29·1 |
| 105° | ·3952 | 69·5 | 27·5 |
| 120° | ·5586 | 51·9 | 29·0 |
| 135° | ·7245 | 43·0 | 31·2 |
| 150° | ·8695 | 33·1 | 28·8 |

আবার বিভিন্ন বেধ ($t$) সম্পন্ন পাত নিয়ে পরীক্ষা করে দেখা যায় যে নির্দিষ্ট কোণে ( $\theta=$ ধ্রুবক ) বিক্ষিপ্ত $\alpha$-কণিকার সংখ্যা $t$ এর সমানুপাতিক হয়। গাইগার এবং মার্সডেন তাঁদের পরীক্ষায় বিভিন্ন পদার্থের পাত ব্যবহার করে উপরোক্ত (খ) সিদ্ধান্তের সত্যতা এইভাবে প্রমাণিত করেন।

যদি নির্দিষ্ট প্রাথমিক শক্তি সম্পন্ন α-কণিকার-ভ্রমণপথের উপরে একটি পাতলা অভ্রের পাত স্থাপিত করা যায় তাহলে পাত থেকে নির্গত কণিকাগুলির শক্তি প্রায় নির্দিষ্ট পরিমাণে হ্রাস পায়। এইভাবে বিভিন্ন বেধ সম্পন্ন অভ্রের পাত ব্যবহার করে গাইগার এবং মার্সডেন বিভিন্ন শক্তি বা বেগ সম্পন্ন α-কণিকাগুচ্ছ প্রাপ্ত হন এবং আর একটি পাতের দ্বারা সেগুলিকে বিক্ষিপ্ত করেন। নির্দিষ্ট বেধ সম্পন্ন বিক্ষেপক পাত ( $t=$ধ্রুবক ) থেকে নির্দিষ্ট কোণে ($\theta=$ধ্রুবক ) বিক্ষিপ্ত α-কণিকার সংখ্যাকে $v^4$ দিয়ে গুণ করলে দেখা যায় যে গুণফল ধ্রুবক হয়।

(12·3) সারণীর শেষ স্তম্ভে লিপিবদ্ধ গাইগার এবং মার্সডেন কর্তৃক প্রাপ্ত এই গুণফলগুলি পরীক্ষার ত্রুটি সীমার মধ্যে প্রায় সমান পাওয়া যায়।

**সারণী—12·3**

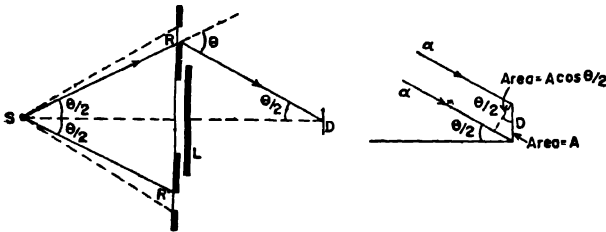
| আপতিত α-কণিকার পথসীমা ( সেমি ) | $1/v^4$ ( আপেক্ষিক মান ) | চমক উৎপাদক পর্দার উপরে আপতিত α-কণিকার সংখ্যা ($N'_s$) | $N'_s \times v^4$ |
|---|---|---|---|
| 5·5 | 1·0 | 24·7 | 25 |
| 4·76 | 1·21 | 29·0 | 24 |
| 4·05 | 1·50 | 33·4 | 22 |
| 3·32 | 1·91 | 44 | 23 |
| 2·51 | 2·84 | 81 | 28 |
| 1·84 | 4·32 | 101 | 23 |
| 1·04 | 9·22 | 255 | 28 |

এইভাবে উপরোক্ত (গ) সিদ্ধান্তের সত্যতা প্রমাণিত হয়। গাইগার ও মার্সডেনের পরীক্ষায় ত্রুটির পরিমাণ বেশী থাকায় উপরোক্ত (ঘ) সিদ্ধান্তটি সঠিক ভাবে প্রমাণিত হয় নি।

### 12·13 : কেন্দ্রকের আধান নির্ণয় ; চ্যাড্‌উইকের পরীক্ষা

(6·10) অনুচ্ছেদে দেখা গেছে যে X-রশ্মি বিক্ষেপ পরীক্ষা অনুষ্ঠিত করে বার্কলা (Barkla) সর্বপ্রথম প্রমাণিত করেন যে কোন মৌলের পরমাণুর মোট ইলেকট্রন সংখ্যা মৌলটির পরমাণবিক সংখ্যার ($Z$) সমান হয়। যেহেতু

প্রত্যেক পরমাণু স্বাভাবিক অবস্থায় আধানহীন হয়, সুতরাং পরমাণু মধ্যস্থ ধনাত্মক ও ঋণাত্মক আধানের পরিমাণ সমান হওয়া উচিত। অর্থাৎ ইলেকট্রনীয় আধানের এককে পরিমিত পরমাণুর ধনাত্মক আধানের মানও পরমাণবিক সংখ্যার সমান হওয়া উচিত। রাদারফোর্ড তত্ত্ব থেকে দেখা যায় যে পরমাণুর সমগ্র ধনাত্মক আধান কেন্দ্রকের মধ্যে নিহিত থাকে এবং কেন্দ্রক থেকে বিক্ষিপ্ত $\alpha$-কণিকার সংখ্যা কেন্দ্রক আধানের বর্গের সমানুপাতিক হয়; অর্থাৎ $N_s \propto Z^2$ হয় ( সমীকরণ 12·23 দ্রষ্টব্য )। স্পষ্টতঃ উক্ত সমীকরণের সাহায্যে নির্দিষ্ট কোণে বিক্ষিপ্ত $\alpha$-কণিকার সংখ্যা গণনা করে কেন্দ্রকের আধান নির্ণয় করা সম্ভব। গাইগার ও মার্সডেনের পূর্ববর্ণিত পরীক্ষায় ত্রুটির পরিমাণ বেশী থাকায় অবশ্য এইভাবে $Z$ নির্ণয় করা সম্ভব হয়নি, একথা উপরে উল্লেখ করা হয়েছে। পরবর্তীকালে রাদারফোর্ডের সুযোগ্য সহকর্মী চ্যাড্উইক (Chadwick) এই পদ্ধতিতে সর্বপ্রথম কেন্দ্রকের আধান নিরূপণ করেন।

চ্যাড্উইক কর্তৃক উদ্ভাবিত পরীক্ষা পদ্ধতি (12·20) চিত্রে প্রদর্শিত হয়েছে। কেন্দ্রক আধানের মান খুব সঠিক ভাবে নির্ণয় করতে হলে $\alpha$-কণিকার বিক্ষেপ

চিত্র 12·20

কেন্দ্রকের আধান নির্ণয়ের জন্য চ্যাড্উ পরীক্ষা ব্যবস্থা।

হার যথেষ্ট বেশী হওয়া প্রয়োজন। সেজন্য বিক্ষেপকের (Scatterer) উপরে উচ্চ হারে $\alpha$-কণিকা আপতিত করা প্রয়োজন। বিক্ষেপকের ক্ষেত্রফল যথেষ্ট বেশী হলেই এটা করা সম্ভব। সেজন্য চ্যাড্উইক একটি খুব স্বল্প বেধ সম্পন্ন বলয়াকৃতি (Ring Shaped) ধাতব পাত বিক্ষেপক হিসাবে ব্যবহার করেন। (12·20) চিত্রে RR′ হচ্ছে এই বলয়াকৃতি ধাতব পাত। বলয়টি প্রস্থে খুব কম রাখা হয়।

S একটি $\alpha$-উৎস এবং D একটি চমক উৎপাদক পর্দা। RR′ বলয়টি এমন ভাবে স্থাপিত করা হয় যে SD সরলরেখা উক্ত বলয়তলের লম্বাভিমুখী হয় এবং বলয়ের কেন্দ্র ভেদ করে যায়। অর্থাৎ S শীর্ষবিন্দু (Vertex) থেকে নির্দিষ্ট অর্ধশীর্ষ কোণ (Semivertical Angle) সম্পন্ন দুটি শংকু অংকিত করলে RR′ বলয় এই দুটি শংকুর অন্তর্বর্তী স্থানে সীমাবদ্ধ থাকে। RR′ এর সাপেক্ষে S এবং D সমদূরত্বে অবস্থিত থাকে, অর্থাৎ $SR=RD$ হয়। (12·20) চিত্র থেকে প্রতীয়মান হয় যে যদি উপরোল্লিখিত শংকুদুটির অর্ধশীর্ষ কোণের গড় মান হয় $\theta/2$ এবং S থেকে RR′ এর উপরে আপতিত হয়ে কোন $\alpha$-কণিকা যদি D পর্দার দিকে বিক্ষিপ্ত হয়, তাহলে SR এবং RD রেখা দুটির অন্তর্গত বিক্ষেপ কোণের মান $\theta$ হবে। RR′ বলয়ের যে কোন স্থানেই $\alpha$-কণিকাটি আপতিত হোক না কেন, এই বিক্ষেপ কোণের মান অপরিবর্তিত থাকবে।

D পর্দার উপরে উৎপন্ন দীপ্তির চমক (Scintillations) গণনা করে RR′ থেকে বিক্ষিপ্ত $\alpha$-কণিকার সংখ্যা নিরূপিত করা যায়। $\alpha$-উৎস S থেকে যাতে D পর্দার উপর কোন $\alpha$-কণিকা সোজাসুজি এসে না পড়তে পারে সেজন্য S এবং D এর মধ্যে একটি সীসার চাদর L রাখা থাকে। $\alpha$-কণিকাগুলি এই সীসার চাদর ভেদ করে যেতে পারে না।

L চাদরটি সরিয়ে D পর্দার উপরে আপতিত $\alpha$-কণিকাগুলির সংখ্যা গণনা করে S উৎস থেকে $\alpha$-কণিকা নিঃসরণের হার নির্ণয় করা যায়। যদি D পর্দার ক্ষেত্রফল হয় $A$ এবং $SD=R$ হয়, তাহলে D এর উপরে $\alpha$-কণিকার আপতন হার হবে

$$N_D=\frac{N_0}{4\pi R^2}\cdot A \qquad (12·24)$$

এখানে $N_0$ হচ্ছে S থেকে সকল দিকে ($4\pi$ ঘনকোণে) $\alpha$-কণিকা নিঃসরণের হার। (12·24) সমীকরণ থেকে $N_0$ নির্ণয় করে RR′ পাতটির উপরে $\alpha$-কণিকার আপতন হার ($N$) নিরূপণ করা সম্ভব। যদি S থেকে RR′ এর দূরত্ব হয় $r$ এবং বলয়টির ভিতরের ব্যাসার্ধ $a$ হয়, তাহলে আমরা পাই

$$\sin\frac{\theta}{2}=\frac{a}{r} \qquad (12·25)$$

আবার S বিন্দুতে RR′ যে ঘনকোণ উৎপন্ন করে তার মান হচ্ছে

$$\Delta\Omega = 2\pi \sin\frac{\theta}{2}\Delta\left(\frac{\theta}{2}\right) = \pi \sin\frac{\theta}{2}\Delta\theta \qquad (12{\cdot}26)$$

বলয়টির প্রস্থ জানা থাকলে $\Delta\theta$ নির্ণয় করা যায়। সুতরাং (12·25) সমীকরণ থেকে $\sin\frac{\theta}{2}$ নির্ণয় করে $\Delta\Omega$ নিরূপণ করা সম্ভব।

যেহেতু উৎস S থেকে α-কণিকাগুলি $4\pi$ ঘনকোণে নিঃসৃত হয়, অতএব RR′ পাতটির উপরে α-কণিকা আপাতনের হার হবে

$$N = \frac{N_o}{4\pi}\Delta\Omega = \frac{N_o}{4} \sin \frac{\theta}{2} \Delta\theta \qquad (12{\cdot}27)$$

(12·24) এবং (12·27) সমীকরণ থেকে আমরা পাই

$$\frac{N}{N_D} = \frac{\pi R^2 \sin\frac{\theta}{2}\Delta\theta}{A} \qquad (12{\cdot}28)$$

(12·28) সমীকরণ থেকে RR′ এর উপরে α-কণিকার আপতন হার $N$ নিরূপণ করা যায়। এখন (12·23) সমীকরণের সাহায্যে $Z^2$ নির্ণয় করা যেতে পারে। এখানে লক্ষণীয় যে (12·23) সমীকরণ প্রতিপন্ন করতে ধরে নেওয়া হয় যে চমক উৎপাদক পর্দাটি α-কণিকার বিক্ষেপ দিকের অভিলম্বে স্থাপিত থাকে। কিন্তু চ্যাড্উইকের পরীক্ষায় D পর্দাটি RD রেখার সংগে $(\pi-\theta)/2$ কোণে বিন্যস্ত থাকে। সুতরাং D পর্দার প্রতি একক ক্ষেত্রফলের উপর আপতিত α-কণিকার সংখ্যা পেতে হলে (12·23) সমীকরণে প্রদত্ত $N_s$ সংখ্যাটিকে $\cos\frac{\theta}{2}$ দ্বারা গুণ করতে হবে। সুতরাং (12·23) ও (12·28) সমীকরণদ্বয় থেকে D পর্দার প্রতি একক ক্ষেত্রফলে চমক উৎপাদনের হার পাওয়া যায়

$$N'_s = \frac{Nnt}{r^2}\left(\frac{Ze^2}{Mv^2}\right)^2 \operatorname{cosec}^4\frac{\theta}{2} \cos\frac{\theta}{2}$$

$$= \frac{\pi N_D}{A}\frac{ntR^2}{r^2}\left(\frac{Ze^2}{Mv^2}\right)^2 \frac{\cos\frac{\theta}{2}\Delta\theta}{\sin^3\frac{\theta}{2}} \qquad (12{\cdot}29)$$

যদি আপতিত $\alpha$-কণিকাগুলির প্রাথমিক শক্তি $Mv^2/2$ জানা থাকে, তাহলে (12·29) সমীকরণ থেকে $Z^2$ নিরূপণ করা যায়। চ্যাড্উইক তাঁর পরীক্ষায় তামা, রুপা এবং প্ল্যাটিনামের কেন্দ্রকীয় আধান নির্ণয় করেন। পরীক্ষার ত্রুটি সীমার মধ্যে ইলেকট্রনীয় আধানের এককে প্রদত্ত তাঁর পরীক্ষালব্ধ ফল এবং মৌলগুলির পরমাণবিক সংখ্যার মধ্যে ভাল সংগতি পাওয়া যায় ( 12·4 সারণী দ্রষ্টব্য )।

**সারণী—12·4**

| মৌল | পরিমিত কেন্দ্রক আধান | পরমাণবিক সংখ্যা |
|---|---|---|
| তামা | 29·3 | 29 |
| রুপা | 46·3 | 47 |
| প্ল্যাটিনাম | 77·4 | 78 |

## 12.14 কেন্দ্রকের আয়তন

রাদারফোর্ডের $\alpha$-বিক্ষেপ তত্ত্ব থেকে পরমাণু কেন্দ্রকের আয়তন (Size) সম্বন্ধে কিছুটা আভাস পাওয়া যায়। সমীকরণ (12·16) এবং (12·18) থেকে দেখা যায় যে কেন্দ্রক থেকে $\alpha$-কণিকার ন্যূনতম দূরত্ব $q$ নির্ভর করে বিক্ষেপ কোণের উপর। যখন বিক্ষেপ কোণ $\theta = 180°$ হয়, তখন $q = q_m$ ন্যূনতম হয়। এক্ষেত্রে $\alpha$-কণিকাটি কেন্দ্রক থেকে ন্যূনতম দূরত্ব পর্যন্ত এসে বিপরীতমুখী হয়ে বিক্ষিপ্ত হয়। অর্থাৎ এই বিন্দুতে $\alpha$-কণিকাটি মুহূর্তের জন্য বেগশূন্য হয়ে যায়। সুতরাং এই বিন্দুতে $\alpha$-কণিকার গতিশক্তি শূন্য হয় এবং মোট শক্তি এর স্থিতিশক্তির $(ZZ'e^2/q_m)$ সমান হয়। যদি $\alpha$-কণিকার প্রাথমিক শক্তি হয় $Mv^2/2$, তাহলে শক্তি সংরক্ষণ সূত্র থেকে আমরা পাই

$$\frac{ZZ'e^2}{q_m} = \frac{1}{2} Mv^2$$

সুতরাং
$$q_m = \frac{2ZZ'e^2}{Mv^2} \qquad (12·30)$$

রেডন গ্যাস ($Rn^{222}$) থেকে নিঃসৃত $\alpha$-কণিকার শক্তি হচ্ছে $\frac{1}{2}Mv^2 = 5·486$ মি-ই-ভো। এক্ষেত্রে উপরের সমীকরণ থেকে পাওয়া যায় :

রুপার ক্ষেত্রে $(Z=47)$ : $q_m = 2{\cdot}45 \times 10^{-12}$ সেমি
সোনার ক্ষেত্রে $(Z=79)$ : $q_m = 4{\cdot}12 \times 10^{-12}$ সেমি

উপরের আলোচনায় $q_m$ এর মান নির্ণয়কালে অনুমান করা হয় যে কেন্দ্রক এবং $\alpha$-কণিকার মধ্যে এত অল্প দূরত্বেও কুলম্ব বিকর্ষণী বল ক্রিয়া করে। গাইগার এবং মার্সডেনের $\alpha$-বিক্ষেপ পরীক্ষা থেকে এই অনুমানের সত্যতা সমর্থিত হয়। এই পরীক্ষা থেকে $\alpha$-বিক্ষেপ তত্ত্বের সমর্থন অন্ততঃ $150^\circ$ বিক্ষেপ কোণ পর্য্যন্ত পাওয়া যায়; এক্ষেত্রে অবশ্য $q$ এর মান $q_m$ অপেক্ষা সামান্য বেশী হয়। যাই হোক, উপরের আলোচনা থেকে বোঝা যায় যে কেন্দ্রকের সমগ্র আধান $q_m$ অপেক্ষা ক্ষুদ্রতর ব্যাসার্ধ সম্পন্ন একটি গোলকের মধ্যে নিহিত থাকলেই এইরূপ হওয়া সম্ভব। সুতরাং $\alpha$-বিক্ষেপ পরীক্ষা থেকে একথা সুস্পষ্টরূপে প্রতীয়মান হয় যে পরমাণু কেন্দ্রকের ব্যাসার্ধ $10^{-12}$ সেমি বা অনুরূপ মাত্রা সম্পন্ন হয়; অর্থাৎ পরমাণুর ব্যাসার্ধের ( $10^{-8}$ সেমি ) দশ সহস্র ভাগ অপেক্ষাও ক্ষুদ্রতর হয়।

পরবর্তী যুগে রাদারফোর্ড নিম্ন পরমাণবিক সংখ্যা সম্পন্ন মৌল থেকে উচ্চশক্তি $\alpha$-কণিকা বিক্ষিপ্ত করে লক্ষ্য করেন যে উচ্চ বিক্ষেপ কোণের ক্ষেত্রে বিক্ষিপ্ত $\alpha$-কণিকার পরীক্ষালব্ধ সংখ্যার সংগে রাদারফোর্ড তত্ত্বের সাহায্যে নিরূপিত সংখ্যার সংগতি পাওয়া যায় না। রাদারফোর্ড ম্যাগনেসিয়াম $(Z=12)$ এবং অ্যালুমিনিয়াম $(Z=13)$ বিক্ষেপক ব্যবহার করে পরীক্ষা করেন। তিনি অনুমান করেন যে উপরোক্ত অস্বাভাবিক বিক্ষেপের (Anomalous Scattering) কারণ হচ্ছে যে এইসব কেন্দ্রকের আধান অপেক্ষাকৃত কম হওয়ার জন্য উচ্চশক্তি $\alpha$-কণিকাগুলি কেন্দ্রকের বিকর্ষণী বল কাটিয়ে তাদের উপরিতল পর্যন্ত এসে পৌছতে পারে। যদিও কেন্দ্রকের বাইরে $\alpha$-কণিকাগুলির উপরে কেন্দ্রকের আধান জনিত কুলম্ব বিকর্ষণী বল ক্রিয়া করে, এর অভ্যন্তরে বলের প্রকৃতি পরিবর্তিত হয়ে যায়। যেহেতু কেন্দ্রকের মধ্যে প্রোটন এবং নিউট্রনগুলি খুব দৃঢ়ভাবে সংবদ্ধ থাকে, অতএব আশা করা যায় যে দুটি প্রোটন এবং দুটি নিউট্রনের সমাবেশে গঠিত একটি $\alpha$-কণিকা যখন কেন্দ্রকের উপরিতলে এসে পড়ে তখন সেটি বিকর্ষণের পরিবর্তে কেন্দ্রকের আকর্ষণী বল অনুভব করবে। ফলে সেটির বিক্ষেপ তখন আর রাদারফোর্ড তত্ত্ব দ্বারা নির্ধারিত হবে না। (12·16) এবং (12·18) সমীকরণ থেকে দেখা যায় যে বিক্ষেপ কোণ যত বাড়ে $\alpha$-কণিকাটি কেন্দ্রকের তত নিকটে আসতে পারে। যে সংকট বিক্ষেপ কোণে ন্যূনতম দূরত্ব

কেন্দ্রকের ব্যাসার্ধ $R$ এর সমান হয়, স্পষ্টতঃ তার থেকে উচ্চতর কোণে অস্বাভাবিক বিক্ষেপ দেখতে পাওয়া যাবে। রাদারফোর্ড এই সংকট বিক্ষেপ কোণের $(\theta = \theta_c)$ মান থেকে বিক্ষেপক পরমাণুর কেন্দ্রকের ব্যাসার্ধের একটা মোটামুটি পরিমাপ করেন। তিনি লক্ষ্য করেন যে ম্যাগনেসিয়াম, অ্যালুমিনিয়াম প্রভৃতি নিম্ন $Z$-সম্পন্ন মৌলের কেন্দ্রকের ব্যাসার্ধ $10^{-12}$ সেমি অপেক্ষা কম হয়।

পরবর্তী যুগে নানারূপ পরীক্ষার সাহায্যে বিভিন্ন কেন্দ্রকের ব্যাসার্ধ সঠিক ভাবে পরিমাপ করা হয়েছে। দেখা যায় যে এই ব্যাসার্ধ মৌলের পরমাণবিক ভরের ঘনমূলের সমানুপাতিক হয় ঃ

$$R = r_0 A^{1/3} \qquad (12{\cdot}31)$$

$r_0$ একটি ধ্রুবক। বিভিন্ন ধরনের পরীক্ষা থেকে $r_0$ সংখ্যাটির মান $1{\cdot}2 \times 10^{-13}$ সেমি থেকে $1{\cdot}5 \times 10^{-13}$ সেমির মধ্যে পাওয়া যায়।

বর্তমানে সার্বিক ভাবে গৃহীত মান হচ্ছে

$$r_0 = 1{\cdot}2 \times 10^{-13} \text{সেমি}$$

(12·31) সমীকরণের সাহায্যে প্রতিপন্ন বিশেষ কতকগুলি কেন্দ্রকের ব্যাসার্ধ (12·5) সারণীতে লিপিবদ্ধ করা হয়েছে ঃ

**সারণী—12·5**

| মৌল | Al | Cu | Ag | Au | U |
|---|---|---|---|---|---|
| $A$ | 27 | 63 | 107 | 179 | 238 |
| $R$ (সেমি) | $3{\cdot}6 \times 10^{-13}$ | $4{\cdot}8 \times 10^{-13}$ | $5{\cdot}7 \times 10^{-13}$ | $6{\cdot}76 \times 10^{-13}$ | $7{\cdot}44 \times 10^{-13}$ |

### 12·15 $\alpha$-বিঘটন তত্ত্ব

(12·6) অনুচ্ছেদে দেখা গেছে যে কোন তেজস্ক্রিয় পরমাণু থেকে $\alpha$-কণিকা নিঃসৃত হবার শর্ত হচ্ছে যে বিঘটনশীল পরমাণুর ভর $(M)$ অবশিষ্ট পরমাণু এবং $\alpha$-কণিকার মোট ভর অপেক্ষা বেশী হবে ; অর্থাৎ $M > M_1 + M_\alpha$ হবে। এখানে $M_1$ হচ্ছে অবশিষ্ট পরমাণুর ভর।

$\alpha$-বিঘটন শক্তির (Disintegration Energy) মান হয় ( 12·10 সমীকরণ দ্রষ্টব্য ) ঃ

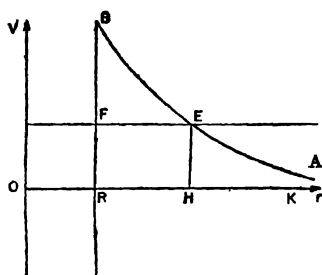
$$Q_\alpha = (M - M_1 - M_\alpha)c^2$$

এই শক্তির বেশীর ভাগই নিঃসৃত $\alpha$-কণিকার গতিশক্তি হিসাবে পাওয়া যায় ; বাকী অল্প পরিমাণ শক্তি অবশিষ্ট কেন্দ্রকের প্রতিক্ষেপ শক্তি (Recoil Energy) হিসাবে পাওয়া যায়।

(16·9) অনুচ্ছেদে দেখা যাবে যে একটি কেন্দ্রক প্রায় সমভর সম্পন্ন কতকগুলি প্রোটন এবং নিউট্রনের দৃঢ় সংবদ্ধ সমন্বয়ে গঠিত হয়। প্রোটন এবং নিউট্রনগুলি কেন্দ্রকের মধ্যে দৃঢ়ভাবে আবদ্ধ থাকার কারণ হচ্ছে তাদের মধ্যেকার কেন্দ্রকীয় আকর্ষণী বলের (Nuclear Attractive Force) ক্রিয়া। এই বল খুব অল্প দূরত্ব পর্যন্ত ( প্রায় $2\times10^{-13}$ সেমি পর্যন্ত ) ক্রিয়াশীল হয়। উপরোক্ত দূরত্ব-সীমার (Range) মধ্যে এই বলের মান কুলম্ব জাতীয় বল অপেক্ষা অনেক বেশী প্রখর হয়। এই বলের ক্রিয়ার ফলে পরমাণু কেন্দ্রকগুলি খুব দৃঢ়সংবদ্ধ হয়। অবশ্য কেন্দ্রকের ভিতরকার প্রোটনগুলির মধ্যে কুলম্ব বিকর্ষণী বলের ক্রিয়ার ফলে কেন্দ্রকের বন্ধন কিছুটা শিথিল হয়। তবে এর প্রভাব খুব ভারী কেন্দ্রকের ক্ষেত্রেই যথেষ্ট পরিমাণে প্রকট হতে পারে। কারণ খুব ভারী কেন্দ্রকের মধ্যে প্রোটন সংখ্যাও যথেষ্ট বেশী হয়। এখন এইরূপ একটি ভারী কেন্দ্রকের প্রোটন সংখ্যা যদি দুই একক পরিমাণে কমে যায় তাহলে নূতন কেন্দ্রকটির বন্ধন আদি কেন্দ্রকটির তুলনায় কিছুটা দৃঢ়তর হয়। (16·6) অনুচ্ছেদে দেখা যাবে যে কেন্দ্রকের বন্ধন যত দৃঢ় হয়, তার মধ্যেকার প্রোটন-নিউট্রনগুলির মোট ভর অপেক্ষা তার আনুপাতিক ভর-হ্রাস তত বেশী হয়। সুতরাং ভারী কেন্দ্রকগুলির ক্ষেত্রে এমন অবস্থা হতে পারে যে $Z$ সংখ্যক প্রোটন এবং $N$ সংখ্যক নিউট্রন সম্পন্ন একটি কেন্দ্রকের ভর, $(Z-2)$ সংখ্যক প্রোটন এবং $(N-2)$ সংখ্যক নিউট্রন সম্পন্ন একটি অপেক্ষাকৃত হালকা কেন্দ্রকের ভর এবং একটি $\alpha$-কণিকার ভরের সমষ্টি অপেক্ষা বেশী হয়ে যায়। অর্থাৎ $M\ (A, Z) > M\ (A-4, Z-2)+M_{\alpha}$ হয়। যখন এইরূপ ঘটে তখন আদি কেন্দ্রকটি একটি $\alpha$-কণিকা নিঃসৃত করে অপেক্ষাকৃত অধিকতর দৃঢ়সংবদ্ধ একটি নূতন কেন্দ্রকে রূপান্তরিত হতে পারে।

শক্তির দিক থেকে কোন ভারী কেন্দ্রকের এইরূপ $\alpha$-বিঘটন সম্ভবপর হলেও, $\alpha$-কণিকাটি নিঃসৃত হবার পথে কিছু প্রতিবন্ধকও থাকে। কেন্দ্রকীয় আকর্ষণী বলের ক্রিয়ার ফলে কেন্দ্রকের বিভব সাধারণতঃ ঋণাত্মক হয়। অর্থাৎ কেন্দ্রকের ভিতরকার প্রোটন এবং নিউট্রনগুলি যেন একটা বিভব কূপের (Potential Well) মধ্যে অবস্থিত থাকে। কিন্তু কুলম্ব বিকর্ষণী বলের

ক্রিয়ার ফলে একটি $\alpha$-কণিকা কেন্দ্রকের বাইরে একটা বিকর্ষণী ধনাত্মক বিভবের সম্মুখীন হয়। $\alpha$-বিঘটনের বিপরীত একটি প্রক্রিয়া (Process) বিবেচনা করলে ব্যাপারটা আরও সুস্পষ্ট হবে।

মনে করা যাক যে $(Z-2)$ প্রোটন এবং $(N-2)$ নিউট্রন সম্পন্ন একটি কেন্দ্রকের দিকে প্রাকৃতিক তেজস্ক্রিয় পদার্থ নিঃসৃত এবং $E_{\alpha}$ প্রাথমিক শক্তি সম্পন্ন একটি $\alpha$-কণিকা নিক্ষেপ করা হয়। $E_{\alpha}$ সাধারণতঃ 4 থেকে 7 মি-ই-ভো হয়। $\alpha$-কণিকাটি কেন্দ্রকের যত সন্নিকটে আসে তার গতিশক্তি তত কমতে থাকে এবং স্থিতিশক্তি $V=(Z-2)Z'e^2/r$ তত বাড়তে থাকে। এই স্থিতিশক্তি ধনাত্মক হয়। অর্থাৎ কেন্দ্রকের বাইরে কুলম্ব বিকর্ষণী বলজনিত বিভব ধনাত্মক হয়। (12·21) চিত্রে দূরত্বের সংগে $\alpha$-কণিকার স্থিতিশক্তি পরিবর্তনের লেখচিত্র প্রদর্শিত হয়েছে। এই চিত্রে কেন্দ্রকের বাইরে কুলম্ব স্থিতিশক্তি AB রেখার দ্বারা নির্দেশিত হয়েছে। যখন

চিত্র 12·21

বিভব প্রতিবন্ধক।

দূরত্ব $r$ কেন্দ্রকের ব্যাসার্ধ $R$ অপেক্ষা কম হয় $(r<R)$ তখন স্থিতিশক্তি সহসা ঋণাত্মক হয়ে যায়। (12·21) চিত্রে কেন্দ্রকের অভ্যন্তরের এই ঋণাত্মক স্থিতিশক্তি BCD রেখার দ্বারা নির্দেশিত হয়েছে। স্পষ্টতঃ কেন্দ্রকের ঠিক উপরিতলে (Surface), অর্থাৎ B বিন্দুতে, ধনাত্মক কুলম্ব স্থিতিশক্তি $V_s=(Z-2)Z'e^2/R$ উচ্চতম হয়। উদাহরণস্বরূপ $Ra^{226}$-এর $\alpha$-বিঘটনের ফলে সৃষ্ট $Rn^{222}$ কেন্দ্রকের ঠিক উপরিতলে কুলম্ব স্থিতিশক্তি প্রায় 34 মি-ই-ভো হয়। এই শক্তি $Ra^{226}$ নিঃসৃত $\alpha$-কণিকার শক্তি 4·78 মি-ই-ভো অপেক্ষা অনেক উচ্চতর হয়।

যদি কোন $\alpha$-কণিকাকে বাইরে থেকে কেন্দ্রকের ভিতরে প্রবেশ করতে হয়, অথবা ভিতর থেকে বাইরে আসতে হয়, তাহলে সনাতন বলবিদ্যা অনুযায়ী তার প্রাথমিক শক্তি অন্ততঃপক্ষে B বিন্দুতে কুলম্ব স্থিতিশক্তির, অর্থাৎ $V_s$ সংখ্যাটির সমান হতে হবে। তা যদি না হয় তাহলে AB এবং BC রেখা দুটির মধ্যবর্তী কিছু অঞ্চলে, অর্থাৎ বিভব-প্রতিবন্ধকের (Potential Barrier) মধ্যে, $\alpha$-কণিকার স্থিতিশক্তি তার মোট শক্তি অপেক্ষা বেশী হবে, যার ফলে তার গতিশক্তি ঋণাত্মক হয়ে যাবে। উদাহরণস্বরূপ যদি $\alpha$-কণিকার প্রাথমিক শক্তি $E_\alpha$ নির্দেশিত হয় FE রেখার দ্বারা, তাহলে স্পষ্টতঃ $E_\alpha < V_s$ হয়। এক্ষেত্রে $\alpha$-কণিকাটি যতক্ষণ কেন্দ্রকের মধ্যে, অর্থাৎ OR অঞ্চলে থাকে, অথবা কেন্দ্রকের বাইরে HK অঞ্চলে থাকে, ততক্ষণ এর মোট শক্তি স্থিতিশক্তি অপেক্ষা উচ্চতর থাকে, এবং এর গতিশক্তি ধনাত্মক হয়। কিন্তু বিভব-প্রতিবন্ধক (Potential Barrier) অর্থাৎ RH অঞ্চলে $\alpha$-কণিকার মোট শক্তি ($E_\alpha$) এর স্থিতিশক্তি অপেক্ষা কম হয়; ফলে এই অঞ্চলে $\alpha$-কণিকার গতিশক্তি ঋণাত্মক হয়ে যায়। এইরূপ ঘটনা অবশ্যই অবাস্তব। ফলে সনাতন বলবিদ্যা অনুযায়ী $V_s$ অপেক্ষা নিম্নতর প্রাথমিক গতিশক্তি সম্পন্ন $\alpha$-কণিকা কখনই বাইরে থেকে কেন্দ্রকের ভিতরে প্রবেশ করতে পারে না বা কেন্দ্রক থেকে নির্গত হতে পারে না।

কিন্তু আধুনিক কোয়ানটাম বলবিদ্যা (Quantum Mechanics) অনুযায়ী $V_s$ অপেক্ষা নিম্নতর প্রাথমিক শক্তি সম্পন্ন $\alpha$-কণিকা কেন্দ্রক থেকে নিঃসৃত হতে অথবা কেন্দ্রকের মধ্যে প্রবেশ করতে পারে। কোয়ানটাম বলবিদ্যা তত্ত্বে $\alpha$-কণিকাটিকে একটি তরঙ্গ হিসাবে দেখা হয়। এই তরঙ্গের প্রকৃতি শ্রোডিংগার সমীকরণ (7·30) দ্বারা নির্ধারিত হয়। বিভিন্ন অঞ্চলে প্রযোজ্য বিভবের মাদ বসিয়ে যদি উক্ত সমীকরণ সমাধান করা যায়, তাহলে দেখা যায় যে যদি একটি $\alpha$-কণিকা প্রথমে কেন্দ্রকের মধ্যে আবদ্ধ থাকে তাহলে $t$ সময় পরে বিভব-প্রতিবন্ধক (Potential Barrier) ভেদ করে সেটির বাইরে চলে আসবার একটা সীমিত সম্ভাব্যতা থাকে। গ্যামো (Gamow), গুর্নে (Gurney) এবং কনডন (Condon) সর্বপ্রথম ১৯২৮ সালে কোয়ানটাম বলবিদ্যার সাহায্যে এইভাবে $\alpha$-বিঘটন ব্যাখ্যা করেন। এই তত্ত্ব অনুযায়ী $\alpha$-কণিকাগুলি যেন কেন্দ্রক থেকে বিভব-প্রতিবন্ধকের মধ্য দিয়ে সুড়ঙ্গ পথে নিঃসৃত হয়। সেজন্য অনেক সময় এইরূপ $\alpha$-নিঃসরণকে বলা হয় সুড়ঙ্গ প্রক্রিয়া (Tunnel Effect)।

এই তত্ত্বের সাহায্যে $\alpha$-কণিকার প্রাথমিক শক্তি এবং $\alpha$-নিঃসারক কেন্দ্রকের অর্ধজীবনকালের (Half Life) মধ্যে একটা গাণিতিক সম্পর্ক পাওয়া যায়। (12·9) অনুচ্ছেদে আমরা দেখেছি যে গাইগার এবং নাটাল সম্পূর্ণভাবে পরীক্ষার ভিত্তিতে এইরূপ একটি সম্পর্ক ( সমীকরণ 12·12$a$ ) আবিষ্কার করেছিলেন। $\alpha$-বিঘটন তত্ত্ব অনুযায়ী বিঘটন ধ্রুবকের (Disintegration Constant) মান পাওয়া যায় ঃ

$$\lambda = Ae^{-G}$$

এখানে $A$ একটি ধ্রুবক, $G$ নির্ভর করে বিভব-প্রতিবন্ধকের উচ্চতা এবং $\alpha$-কণিকার শক্তির উপরে ; এই শক্তি যত বাড়ে $G$ তত কমে, অর্থাৎ $\lambda$ তত অধিক হয়। গাইগার-নাটাল সূত্রের সংগে এই সিদ্ধান্তের সংগতি দেখা যায়। উপরোক্ত তত্ত্বের সাহায্যে $\alpha$-শক্তির অল্প পার্থক্যের জন্য বিঘটন ধ্রুবকের বিপুল পরিমাণে পরিবর্তনও ব্যাখ্যা করা যায় ( 12·9 অনুচ্ছেদ দ্রষ্টব্য )। (12·21) চিত্র থেকে দেখা যায় যে $\alpha$-কণিকার প্রাথমিক শক্তি যত কম হয়, ততই সেটিকে প্রশস্ততর বিভব প্রতিবন্ধক ভেদ করে কেন্দ্রক থেকে নিঃসৃত হতে হয়। তত্ত্ব অনুযায়ী এক্ষেত্রে $G$ সংখ্যাটির মান বৃদ্ধি পায়। ফলে $\alpha$-বিঘটনের সম্ভাব্যতা কমে যায়। কারণ প্রকৃতপক্ষে বিঘটন সম্ভাব্যতা (Probability of Disintegration) নির্ধারিত হয় $\lambda$ বিঘটন ধ্রুবক দ্বারা। যেহেতু $G$ সংখ্যাটি $e^{-G}$ সূচক-উৎপাদকের সূচক (Exponent) হিসাবে বর্তমান থাকে, এর অল্প পরিবর্তন হলেই $\lambda$ বিপুল পরিমাণে পরিবর্তিত হয়।

### 12·16 : $\alpha$-রশ্মি বর্ণালীর সূক্ষ্ম গঠন ; দীর্ঘ পথসীমা সম্পন্ন $\alpha$-কণিকা

আমরা পূর্বে দেখেছি যে অনেক স্বাভাবিক তেজস্ক্রিয় মৌল থেকে কেবল একটি নির্দিষ্ট শক্তি সম্পন্ন $\alpha$-রশ্মিগুচ্ছ নির্গত হয়। আবার কোন কোন মৌলের ক্ষেত্রে একাধিক নির্দিষ্ট শক্তি সম্পন্ন $\alpha$-রশ্মিগুচ্ছ নিঃসৃত হতে দেখা যায়। একই শক্তি সম্পন্ন $\alpha$-রশ্মিগুচ্ছের শক্তির সম্পূর্ণ সমতা থেকে প্রতীয়মান হয় যে এইসব $\alpha$-কণিকা নিঃসারক কেন্দ্রকের একটি বিশেষ শক্তিস্তর (Energy Level) থেকে অবশিষ্ট কেন্দ্রকের একটি বিশেষ শক্তিস্তরে সংক্রমণের ফলে উদ্ভূত হয়।

যদি আদি কেন্দ্রকের ভৌম অবস্থা (Ground State) এবং অবশিষ্ট কেন্দ্রকের ভৌম অবস্থার মধ্যে এইরূপ সংক্রমণ ঘটে তাহলে একটি মাত্র

নির্দিষ্ট শক্তি সম্পন্ন $\alpha$-রশ্মিগুচ্ছ নিঃসৃত হবে। অপরপক্ষে যদি আদি কেন্দ্রকের উত্তেজিত অবস্থা থেকে অবশিষ্ট কেন্দ্রকের উত্তেজিত বা ভৌম অবস্থার মধ্যে অথবা আদি কেন্দ্রকের ভৌম অবস্থা থেকে অবশিষ্ট কেন্দ্রকের উত্তেজিত বা ভৌম অবস্থার মধ্যে সংক্রমণ ঘটে তাহলে একাধিক নির্দিষ্ট শক্তি সম্পন্ন $\alpha$-রশ্মিগুচ্ছ পাওয়া যেতে পারে। এই জাতীয় সংক্রমণগুলিকে সাধারণতঃ দুই ভাগে ভাগ করা যায় ঃ

**(ক)** আদি $X^A$ কেন্দ্রকটির উত্তেজিত অবস্থা থেকে $\alpha$-কণিকা নিঃসৃত হবার ফলে অবশিষ্ট $Y^{A-4}$ কেন্দ্রকটি ভৌম অবস্থায় সৃষ্ট হয় ( 12·22 চিত্র দ্রষ্টব্য )। স্পষ্টতঃ এই $\alpha$-কণিকাগুলির শক্তি আদি এবং অবশিষ্ট কেন্দ্রকের ভৌম অবস্থার মধ্যে সংক্রমণের ফলে নিঃসৃত প্রধান $\alpha$-গুচ্ছের শক্তি $E''_\alpha$ অপেক্ষা বেশী হবে। এইসব $\alpha$-রশ্মিগুচ্ছের পথসীমাও (Range) প্রধান

$E'_\gamma$ $E''_\gamma$

$E''_\alpha$

$Y^{A-4}_{Z-2}$

চিত্র 12·22

দীর্ঘ পথসীমা সম্পন্ন $\alpha$-গুচ্ছের উৎপত্তি।

গুচ্ছের পথসীমা অপেক্ষা যথেষ্ট বেশী হয়। এদের বলা হয় দীর্ঘ পথসীমা (Long Range) সম্পন্ন $\alpha$-কণিকা। এদের তীব্রতা (Intensity) প্রধান $\alpha$-গুচ্ছের তুলনায় খুবই কম হয়। সাধারণতঃ RaC′, ThC′ প্রভৃতি খুব নিম্ন অর্ধজীবনকাল সম্পন্ন পরমাণু থেকেই এইরূপ দীর্ঘ পথসীমা সম্পন্ন $\alpha$-কণিকা নিঃসৃত হয়। উদাহরণস্বরূপ ThC′ ( $\tau = 3 \times 10^{-7}$ সেকেণ্ড ) থেকে 12·6 সারণীতে প্রদত্ত $\alpha$-কণিকাগুলি নিঃসৃত হতে দেখা যায়।

উক্ত সারণী থেকে দেখা যায় যে ThC′ থেকে নিঃসৃত 8·947 মি-ই-ভো শক্তি সম্পন্ন প্রধান $\alpha$-গুচ্ছের তুলনায় দীর্ঘ পথসীমা সম্পন্ন অন্যান্য গুচ্ছসমূহের তীব্রতা অনেক কম হয়।

উপরোক্ত তথ্যসমূহ নিম্নলিখিত উপায়ে ব্যাখ্যা করা যায়। উত্তেজিত আদি কেন্দ্রকটির পক্ষে আর একটি বিকল্প পদ্ধতিতে সংক্রমিত হবার সম্ভাবনা থাকে। আদি কেন্দ্রকটি উত্তেজিত অবস্থা থেকে তড়িৎচুম্বকীয় γ-রশ্মি $E_\gamma'$, $E_\gamma''$ প্রভৃতি নিঃসৃত করে ভৌম শক্তিস্তরে সংক্রমিত হয়ে α-কণিকা ( প্রধান গুচ্ছ ) নিঃসৃত করতে পারে। বস্তুতঃ উত্তেজিত আদি কেন্দ্রক থেকে সোজাসুজি α-নিঃসরণের তুলনায় উপরোক্ত γ-সংক্রমণের সম্ভাব্যতা অনেক বেশী হয়। কারণ কোন কেন্দ্রকের উত্তেজিত শক্তিস্তর থেকে γ-নিঃসরণের অর্ধজীবনকালের মান $10^{-13}$ সেকেণ্ডের মত হয়। কাজেই উক্ত স্তর থেকে α-নিঃসরণের অর্ধ-জীবনকাল যদি উপরোক্ত γ-অর্ধজীবনকালের সংগে তুলনীয়

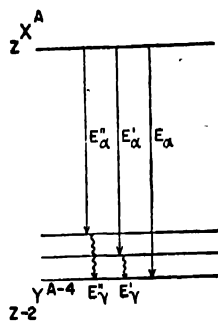
**সারণী—12.6**

| α-শক্তি | আপেক্ষিক তীব্রতা |
|---|---|
| 8·947 মি-ই-ভো | $10^6$( প্রধান গুচ্ছ ) |
| 9·673 ” | 34 |
| 10·744 ” | 190 |

না হয়, তাহলে আদি কেন্দ্রকটি প্রধানতঃ γ-নিঃসরণ করে ভৌমস্তরে সংক্রমিত হবে। তারপরে এর থেকে α-নিঃসরণ হবে। সেইজন্য কেবল অত্যন্ত নিম্ন অর্ধজীবনকাল সম্পন্ন RaC′, ThC′ প্রভৃতি পরমাণু থেকে দীর্ঘ পথসীমা সম্পন্ন α-কণিকা-গুচ্ছ নিঃসৃত হতে দেখা যায়। এদের ক্ষেত্রেও এই কণিকাগুচ্ছ সমূহের তীব্রতা খুব কম হয়। স্পষ্টতঃ প্রধান α-গুচ্ছের তীব্রতা এবং এই জাতীয় α-গুচ্ছের তীব্রতা যথাক্রমে পরমাণুটির γ-অর্ধজীবনকাল এবং α-অর্ধ-জীবনকালের ব্যস্তানুপাতিক হবে। ThC′ পরমাণুর ক্ষেত্রে এই অনুপাত হবে ( প্রায় )

$$\frac{1}{10^{-13}} : \frac{1}{10^{-7}} = 10^6 : 1$$

(খ) এক্ষেত্রে আদি $X^A$ কেন্দ্রকের ভৌম অবস্থা থেকে α-নিঃসরণের ফলে $Y^{A-4}$ কেন্দ্রকটি উত্তেজিত বা ভৌম অবস্থায় সৃষ্ট হয় ( 12·23 চিত্র দ্রষ্টব্য )। উভয় প্রকার সংক্রমণের সম্ভাব্যতা (Probability) এক্ষেত্রে পরস্পরের সঙ্গে তুলনীয় হয়। ফলে বিভিন্ন নিঃসৃত α-গুচ্ছের তীব্রতাও প্রায় সমমাত্রিক হয়। এই জাতীয় α-গুচ্ছসমূহকে বলা হয় α-বর্ণালীর 'সূক্ষ্ম গঠন' (Fine Structure)। এক্ষেত্রে প্রধান α-গুচ্ছের শক্তি $E_\alpha$ উচ্চতম হয়।

যদি $\alpha$-নিঃসরণের ফলে অবশিষ্ট কেন্দ্রকটি উত্তেজিত অবস্থায় সৃষ্ট হয়, তাহলে উক্ত অবশিষ্ট কেন্দ্রকটি $10^{-13}$ সেকেণ্ডের মধ্যে $\gamma$ রশ্মি ( $E'_\gamma, E''_\gamma$

চিত্র 12·23

$\alpha$-বর্ণালীর সূক্ষ্ম গঠন।

প্রভৃতি ) নিঃসৃত করে ভৌম অবস্থায় সংক্রমিত হয়। উদাহরণস্বরূপ ThC ($\tau = 60·5$ মিনিট ) থেকে নিম্নলিখিত $\alpha$-রশ্মিগুচ্ছসমূহ নিঃসৃত হতে দেখা যায় ঃ

সারণী—12·7

| $\alpha$-শক্তি | আপেক্ষিক তীব্রতা |
|---|---|
| 6·200 মি-ই-ভো | 27·2 ( প্রধান গুচ্ছ ) |
| 6·160 ” | 69·8 |
| 5·872 ” | 1·80 |
| 5·728 ” | 0·16 |
| 5·708 ” | 1·10 |

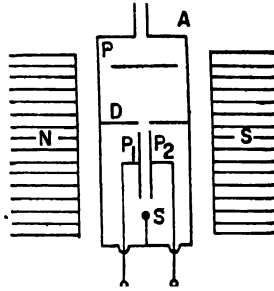
উপরে আলোচিত উভয় ক্ষেত্রেই নিঃসৃত $\alpha$-গুচ্ছগুলির শক্তি এবং বিকম্প সংক্রমণের ফলে উদ্ভূত $\gamma$-রশ্মি রেখাগুলির শক্তির মধ্যে নির্দিষ্ট সম্পর্ক লক্ষ্য করা যায়। এ সম্বন্ধে পরে (14·9) অনুচ্ছেদে আরও আলোচনা করা হবে।

পরিচ্ছেদ 13

# বীটা রশ্মির ধর্মাবলী ; বীটা বিঘটন তত্ত্ব

## 13·1 : $\beta$-কণিকার $e/m$ নির্ণয়

তেজস্ক্রিয় পদার্থ নিঃসৃত $\beta$-রশ্মি যে উচ্চ শক্তি সম্পন্ন ইলেকট্রন একথা পূর্বে উল্লিখিত হয়েছে ( 11·3 অনুচ্ছেদ দ্রষ্টব্য )। মাদাম কুরী সর্বপ্রথম প্রমাণ করেন যে $\beta$-রশ্মি প্রকৃতপক্ষে ঋণাত্মক আধানবাহী একপ্রকার কণিকা যাদের ভেদ্যতা $\alpha$-রশ্মি অপেক্ষা অনেক উচ্চতর হয়। পরে বেকেরেল লক্ষ্য করেন যে এই কণিকাগুলি চৌম্বক ক্ষেত্রে $\alpha$-রশ্মি অপেক্ষা অনেক বেশী বিচ্যুত হয়। এর থেকে প্রমাণিত হয় যে এগুলির ভর $\alpha$-রশ্মির তুলনায় অনেক কম। বেকেরেল $\beta$-কণিকাগুলির $e/m$ মোটামুটি ভাবে নির্ণয় করে দেখান যে এগুলি হচ্ছে ইলেকট্রন। বেকেরেল আরও লক্ষ্য করেন যে তেজস্ক্রিয় পদার্থ নিঃসৃত $\beta$-কণিকাগুলি $\alpha$-কণিকার মত সমবেগ সম্পন্ন হয় না।

কাওফ্‌মান্ (Kaufmann) নামক বিজ্ঞানী ১৯০১ সালে সর্বপ্রথম সঠিকভাবে $\beta$-কণিকার $e/m$ নির্ণয় করেন। তাঁর পরীক্ষা ব্যবস্থা (13·1) চিত্রে

চিত্র 13·1

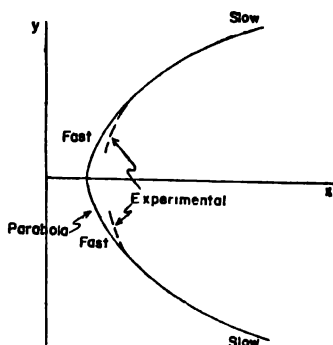
$\beta$-কণিকার $e/m$ নির্ণয়ের জন্য কাওফ্‌মানের পরীক্ষা পদ্ধতি।

প্রদর্শিত হয়েছে। A একটি খুব নিম্ন বায়ুচাপ সম্পন্ন আবদ্ধ আধার, যার মধ্যে অল্প পরিমাণ রেডিয়াম $\beta$-উৎস (S) হিসাবে রাখা থাকে। উৎস থেকে নিঃসৃত $\beta$-কণিকাগুলি খুব কাছাকাছি স্থাপিত $P_1$ এবং $P_2$ দুটি সমান্তরাল ধাতব প্লেটের মধ্যবর্তী অঞ্চলে প্রবেশ করে। এখান থেকে নিঃসৃত হয়ে

কণিকাগুলি D মধ্যচ্ছদার (Diaphragm) ছিদ্র পার হয়ে P ফোটো-গ্রাফিক প্লেটের উপর আপতিত হয়। সমগ্র যন্ত্রটি একটি চুম্বকের N,S মেরুদুটির মধ্যবর্তী স্থানে অবস্থিত থাকে। চৌম্বক ক্ষেত্র $H$ পুস্তকের পাতার সমান্তরালে এবং $\beta$-কণিকার গতিপথের অভিলম্বে ক্রিয়া করে। $P_1$ এবং $P_2$ প্লেট দুটির মধ্যে উচ্চ বিভব প্রভেদ ( কয়েক সহস্র ভোল্ট পর্যন্ত ) প্রয়োগ করে চৌম্বক ক্ষেত্রের সমান্তরালে ক্রিয়াশীল একটি তড়িৎক্ষেত্র উৎপন্ন করা যায়।

যদি $\beta$-কণিকার ভর $m$, আধান $e$ এবং বেগ $v$ হয়, তাহলে $H$ চৌম্বক ক্ষেত্রের প্রভাবে পুস্তকের পাতার অভিলম্বে কণিকাগুলির যে বিচ্যুতি ঘটে তার পরিমাণ $e/mv$ সংখ্যাটির সমানুপাতিক হয়। অপরপক্ষে $X$ তড়িৎক্ষেত্র $\beta$-কণিকাগুলিকে পুস্তকের পাতার সমান্তরালে বিচ্যুত করে। এই বিচ্যুতি $e/mv^2$ সংখ্যাটির সমানুপাতিক হয় ( 2·8 অনুচ্ছেদ দ্রষ্টব্য )। স্পষ্টতঃ চৌম্বক এবং তাড়িত বিচ্যুতি পরস্পরের অভিলম্বে ঘটে। কাওফ্-মানের এই পরীক্ষা পদ্ধতি টমসন কর্তৃক ধনাত্মক রশ্মির (Positive Rays) আপেক্ষিক আধান নিরূপণ পদ্ধতির অনুরূপ ( 2·8 অনুচ্ছেদ দ্রষ্টব্য )। টমসন কর্তৃক অনুষ্ঠিত উক্ত পরীক্ষা আলোচনা কালে দেখা গেছে যে একই আপেক্ষিক আধান কিন্তু বিভিন্ন বেগ সম্পন্ন ধনাত্মক আয়নগুলি ফোটোগ্রাফিক প্লেটের উপরে একটি অধিবৃত্তাকার (Parabolic) রেখা সৃষ্টি করে। কাওফ্মানও তাঁর পরীক্ষায় নির্দিষ্ট উৎস থেকে নিঃসৃত $\beta$-কণিকাগুলির ক্ষেত্রে অনুরূপ অধিবৃত্তাকার রেখার নিদর্শন পান। এর থেকে সুস্পষ্টভাবে প্রতীয়মান হয় যে উৎস থেকে নিঃসৃত $\beta$-কণিকাগুলি সব সমবেগ সম্পন্ন হয় না ; এদের বেগ একটা নির্দিষ্ট সীমার মধ্যে বণ্টিত থাকে।

টমসনের মত কাওফ্মানও চৌম্বক ক্ষেত্রের দিক বিপরীতমুখী করে অক্ষের অপর পার্শ্বে আর একটি অধিবৃত্ত রেখা পান ( 13·2 চিত্র দ্রষ্টব্য ) এই দুটি রেখার অনুরূপ বিন্দুগুলির মধ্যেকার দূরত্ব পরিমাপ করে তিনি বিভিন্ন বেগ সম্পন্ন $\beta$-কণিকার $e/m$ নিরূপণ করেন। তিনি লক্ষ্য করেন যে যদিও মন্থরগতি $\beta$-কণিকার ক্ষেত্রে নিরূপিত $e/m$ ইলেকট্রনের $e/m$ এর প্রায় সমান হয়, খুব দ্রুতগতি $\beta$-কণিকার ক্ষেত্রে $e/m$ এর মান কম হয়। তিনি আরও লক্ষ্য করেন যে এইসব দ্রুতগতি $\beta$-কণিকা ফোটোগ্রাফিক প্লেটের উপরে সৃষ্ট কৃষ্ণরেখার যে অংশে আপতিত হয় সেই অংশটি ঠিক অধিবৃত্তাকার (Parabolic) হয় না ( 13·2 চিত্র দ্রষ্টব্য )।

কাওফ্‌মান $\beta$-কণিকার বেগের সংগে $e/m$ এর যে পরিবর্তন লক্ষ্য করেন তা আইনষ্টাইনের বিশেষ আপেক্ষিকতাবাদ (Special Theory of

চিত্র 13·2

কাওফ্‌মান কর্তৃক প্রাপ্ত অধিবৃত্তের নিদর্শন। লক্ষণীয় যে দ্রুত গতি $\beta$-কণিকার ক্ষেত্রে পরীক্ষালব্ধ রেখাংশ অধিবৃত্ত থেকে কিছু পরিমাণ অপসৃত হয়ে যায়।

Relativity) থেকে আশা করা যায়। উক্ত তত্ত্ব অনুযায়ী $\beta$-কণিকাগুলির বেগ যখন খুব উচ্চ হয়, অর্থাৎ শূন্যে আলোকের বেগের সঙ্গে তুলনীয় হয় ($v \simeq c$), তখন কণিকাগুলির ভর বৃদ্ধি পায়। যদি $m_0$ হয় কণিকাগুলির স্থির-ভর এবং $v$ বেগে ভ্রমণশীল কণিকাগুলির ভর $m$ হয়, তাহলে (8·25) সমীকরণ অনুযায়ী আমরা পাই

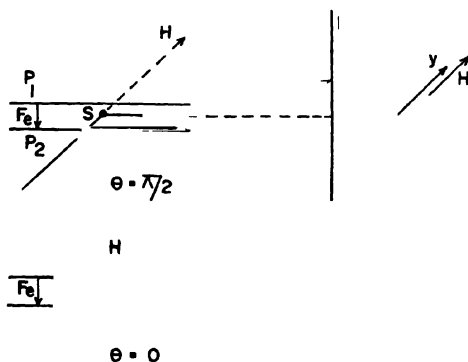
$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$$

ইলেকট্রনের ন্যায় হালকা কণিকার ক্ষেত্রে শক্তির পরিমাণ মি-ই-ভো ($10^6$ ই-ভো) মাত্রিক হলেই কণিকার বেগ $v$ আলোকের বেগের সংগে তুলনীয় হয়। ফলে এইরূপ শক্তি সম্পন্ন ইলেকট্রনের ক্ষেত্রে আপেক্ষিকতাবাদ অনুযায়ী ভর বৃদ্ধির পরিমাণ যথেষ্ট হয়। অপরপক্ষে সমমাত্রিক শক্তি সম্পন্ন ভারী কণিকার ( যথা $\alpha$-কণিকার ) ক্ষেত্রে বেগ $v$ আলোকের বেগ অপেক্ষা অনেক কম হয়। সেজন্য এদের ক্ষেত্রে ভর বৃদ্ধি উপেক্ষা করা যায়। উদাহরণস্বরূপ এক মি-ই-ভো ইলেকট্রনের $v/c \simeq 0·943$ এবং $m = 3m_0$ হয়; অপর পক্ষে সমশক্তি প্রোটনের $v/c \approx 0·0462$ হয় এবং ভর বৃদ্ধি উপেক্ষণীয় হয়।

স্পষ্টতঃ বেগ যত উচ্চ হয় $m$ তত বৃদ্ধি পায় এবং $e/m$ ও তত হ্রাস পায়। কাওফ্‌মানের পরীক্ষায় বেগের সংগে $e/m$ এর পরিবর্তন লক্ষ্য করা গেলেও এই পরিবর্তন খুব সঠিক ভাবে পরিমিত হয় নি। ফলে $e/m$ এর পরিবর্তন উপরে প্রদত্ত সূত্র অনুযায়ী হয় কিনা তা নিশ্চিত ভাবে নির্ধারিত করা সম্ভব হয় নি।

উচ্চ বেগের ক্ষেত্রে $\beta$-কণিকাগুলি কর্তৃক সৃষ্ট কৃষ্ণরেখাটি অধিবৃত্তাকার না হবার কারণও আইনষ্টাইনের তত্ত্ব থেকে প্রতীয়মান হয়। টমসনের অধিবৃত্ত পদ্ধতি আলোচনা কালে দেখা গেছে যে অধিবৃত্তের বিভিন্ন বিন্দুগুলির স্থানাংকদ্বয়ের মধ্যেকার গাণিতিক সম্পর্ক আয়নগুলির আপেক্ষিক আধানের উপরে নির্ভরশীল (2·24 সমীকরণ দ্রষ্টব্য)। যদি আয়নের ভর কোন কারণে পরিবর্তিত হয়ে যায়, তাহলে স্পষ্টতঃ উপরোক্ত গাণিতিক সম্পর্ক প্রযোজ্য হয় না। যেহেতু উচ্চবেগ সম্পন্ন $\beta$-কণিকার ভর বৃদ্ধি পায়, সেইজন্য এদের ক্ষেত্রে ফোটোগ্রাফিক প্লেটের উপরে উৎপন্ন রেখাটিও অধিবৃত্তাকার হতে পারে না।

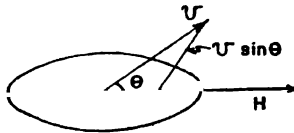
## 13·2 : বুখারেরের পরীক্ষা

কাওফ্‌মানের পরে বুখারের (A. H. Bucherer) নামক জার্মান বিজ্ঞানী ১৯০৮ সালে খুব সঠিক ভাবে $\beta$-কণিকার $e/m$ নিরূপণ করার জন্য

চিত্র 13·3

$\beta$-কণিকার $e/m$ নির্ণয়ের জন্য বুখারেরের পরীক্ষা পদ্ধতি। উপরের চিত্রে চৌম্বক ক্ষেত্রের অভিলম্বে এবং নীচের চিত্রে চৌম্বক ক্ষেত্রের সমান্তরালে ভ্রমণশীল $\beta$-কণিকাগুলির পরিভ্রমণ পথ প্রদর্শিত হয়েছে।

একটি নূতন পরীক্ষা পদ্ধতি উদ্ভাবিত করেন। এই পরীক্ষার দ্বারা বেগের সংগে $\beta$-কণিকার ভরের পরিবর্তনও সঠিক ভাবে নির্ণয় করা যায়।

বুখারেরের পরীক্ষা ব্যবস্থা (13·3) চিত্রে প্রদর্শিত হয়েছে। $\beta$-উৎস হিসাবে ব্যবহৃত অল্প পরিমাণ রেডিয়াম ফ্লোরাইড যৌগ বৃত্তাকার দুটি রুপার দ্বারা প্রলিপ্ত এবং কাঁচ নির্মিত ধারক (Condenser) প্লেটের ঠিক মধ্যবর্তী স্থানে রাখা থাকে। আট সেণ্টিমিটার ব্যাস বিশিষ্ট $P_1$ এবং $P_2$ সমান্তরাল প্লেট দুটির মধ্যেকার ব্যবধান খুব কম (0·25 মিমি) রাখা হয়। F হচ্ছে একটি ফোটোগ্রাফিক ফিল্‌ম যাকে বেলনাকারে পাকিয়ে ধারক প্লেট দুটিকে সমাক্ষীয়ভাবে বেষ্টিত করে এদের কিনারা থেকে 5 সেমি দূরে স্থাপিত করা হয়। সমগ্র যন্ত্রটিকে একটি খুব নিম্ন বায়ুচাপ সম্পন্ন আধারের মধ্যে রাখা হয়।

$P_1, P_2$ প্লেট দুটির মধ্যে উচ্চ বিভব প্রভেদ প্রয়োগ করে (13·3) চিত্রে উল্লম্ব দিকে একটি তড়িৎক্ষেত্র প্রয়োগ করা হয়। তাছাড়া প্লেট দুটির সমান্তরালে একটি চৌম্বক ক্ষেত্রও প্রয়োগ করা হয়। চৌম্বক বিচ্যুতি এবং তাড়িত বিচ্যুতি পরস্পরের সমান্তরালে ঘটে। যেহেতু $P_1$ এবং $P_2$ প্লেট দুটির পারস্পরিক ব্যবধান খুব কম, অতএব কেবল এদের তলের সমান্তরালে নিঃসৃত $\beta$-কণিকাগুলি ধারকের অভ্যন্তর থেকে নির্গত হয়ে F ফোটোগ্রাফিক ফিল্‌মের দিকে অগ্রসর হতে পারে। প্রযুক্ত তড়িৎক্ষেত্রের প্রাবল্য (Intensity) যদি $X$ হয়, তাহলে $e$ আধানবাহী $\beta$-কণিকার উপরে $F_e = Xe$ তাড়িত বল ক্রিয়া করে। এই বলের প্রভাবে উৎস থেকে নিঃসৃত $\beta$-কণিকাগুলি (13·3) চিত্রে নীচের দিকে বিচ্যুত হয়ে ধারক প্লেটের উপরে আপতিত হয় এবং প্লেটদ্বয়ের অন্তর্বর্তী অঞ্চল থেকে নির্গত হতে পারে না।

চিত্র 13·4

চৌম্বক ক্ষেত্রের সংগে $\theta$ কোণে নিঃসৃত $\beta$-কণিকার উপরে চৌম্বক ক্ষেত্রের ক্রিয়া।

এখন $H$ চৌম্বক ক্ষেত্র যদি এমন হয় যে $F_m$ চৌম্বক বল $F_e$ তাড়িত বলের সমান এবং বিপরীতমুখী হয়, তাহলে এই দুই প্রকার বল পরস্পরকে বাতিল করে এবং তার ফলে ধারক প্লেটের সমান্তরালে নিঃসৃত কণিকাগুলি

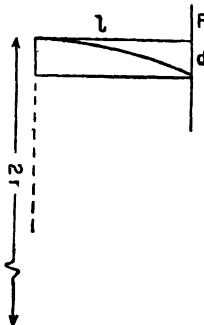
প্লেটদ্বয়ের অন্তর্বর্তী স্থানে থেকে নির্গত হতে পারে। যেহেতু $H$ চৌম্বক ক্ষেত্র ধারক প্লেটদ্বয়ের তলের সমান্তরালে নির্দিষ্ট দিকে ক্রিয়া করে, স্পষ্টতঃ উৎস থেকে বিভিন্ন দিকে নিঃসৃত $\beta$-কণিকাগুলির গতির দিক এবং চৌম্বক ক্ষেত্রের অন্তর্গত কোণ ভিন্ন হয় ( 13·4 চিত্র দ্রষ্টব্য )। যদি চৌম্বক ক্ষেত্রের সংগে $\theta$ কোণে নিঃসৃত $\beta$-কণিকার বেগ হয় $v$, তাহলে উক্ত কণিকার উপরে ক্রিয়াশীল চৌম্বক বল হবে

$$F_m = \frac{Hev}{c} \sin\theta$$

ধরা যাক যে $v$ এমন হয় যে এই চৌম্বক বল এবং তাড়িত বল $F_e = Xe$ পরস্পরের সমান এবং বিপরীতমুখী হয় ; অর্থাৎ

$$\frac{Hev}{c} \sin\theta = Xe$$

অতএব $$v = cX/H \sin\theta \qquad (13·1)$$

যদি $X$ ও $H$ নির্দিষ্ট থাকে তাহলে উৎস থেকে $\theta$ কোণে নিঃসৃত $\beta$-কণিকাগুলির মধ্যে কেবল (13·1) সমীকরণ দ্বারা নির্ধারিত বেগ সম্পন্ন কণিকাগুলি ধারকের অভ্যন্তর থেকে নির্গত হতে পারে। ধারক থেকে নির্গত হবার পর, $\beta$-কণিকাগুলির উপরে কেবল চৌম্বক ক্ষেত্র ক্রিয়া করে, তড়িৎক্ষেত্র ক্রিয়া করে না। ফলে চৌম্বক ক্ষেত্রের প্রভাবে কণিকাগুলি উপরের বা

চিত্র 13·5

$\beta$-কণিকার ভ্রমণপথের ব্যাসার্ধ নির্ণয়।

নীচের দিকে বিচ্যুত হয়ে সর্পিল পথে পরিভ্রমণ করে। কেবল $\theta = \pi/2$ কোণে নির্গত কণিকাগুলি একটি বৃত্তচাপাকৃতি পথে পরিভ্রমণ করে। এদের

উপরে ক্রিয়াশীল চৌম্বক বল এবং অভিকেন্দ্রিক বল (Centripetal Force) পরস্পরের সমান হয় এবং এদের বিচ্যুতি সর্বাধিক হয়।

এক্ষেত্রে $Hev \quad mv^2$

অর্থাৎ $r = \dfrac{mvc}{He}$

যদি ধারকের প্রান্ত থেকে ফিল্‌ম F পর্যান্ত দূরত্ব হয় $l$ এবং $\theta = \pi/2$ কোণে নির্গত কণিকাগুলির বিচ্যুতি হয় $d$, তাহলে (13·5) চিত্র থেকে আমরা পাই

$$(2r - d)d = l^2$$

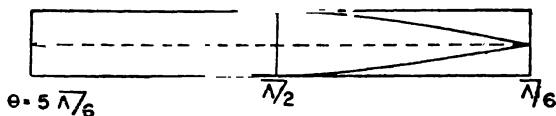
উপরে প্রদত্ত সমীকরণ দুটি থেকে পাওয়া যায়

$$e/m = \frac{2vcd}{H(l^2 + d^2)}$$

সুতরাং (13·1) সমীকরণ থেকে $\theta = \pi/2$ বসিয়ে পাওয়া যায়

$$e/m = \frac{2c^2Xd}{H^2(l^2 + d^2)} \qquad (13·2)$$

ফিল্‌মের উপরের বিচ্যুতি $d$ পরিমাপ করে $e/m$ নির্ণয় করা যায়।

বুখারেরের পরীক্ষায় তড়িৎক্ষেত্র এবং চৌম্বক ক্ষেত্র অপরিবর্তিত রেখে ধারক থেকে বিভিন্ন দিকে নির্গত $\beta$-কণিকাগুলিকে F ফোটোগ্রাফিক ফিল্‌মের উপরে আপতিত করান হয়। ফিল্‌মটিকে এইভাবে কিছুক্ষণ উদ্ভাসিত

চিত্র 13·6

বুখারের কর্তৃক প্রাপ্ত চিত্রের নিদর্শন।

(Exposed) করার পর তড়িৎক্ষেত্র ও চৌম্বক ক্ষেত্রের দিক বিপরীতমুখী করা হয় এবং পূর্বের মত ফিল্‌মটিকে আবার কিছুক্ষণ উদ্ভাসিত করা হয়। ফিল্‌মটিকে বিকসিত করলে (13·6) চিত্রের অনুরূপ দুটি প্রতিসম

(Symmetric) কৃষ্ণরেখা দেখতে পাওয়া যায়। (13·6) চিত্র থেকে দেখা যায় যে $\theta = \pi/2$ কোণে আগত $\beta$-কণিকাগুলি ফিল্‌মের কেন্দ্রীয় অক্ষ থেকে সর্বাধিক বিচ্যুত হয় ; $\theta = 0$ বা $\pi$ কোণে বিচ্যুতি নিম্নতম হয়। অন্যান্য কোণে বিচ্যুতির মান উপরোক্ত দুই সীমার মধ্যে নিরবচ্ছিন্ন ভাবে পরিবর্তিত হয়।

প্রকৃতপক্ষে বুখারেরের পরীক্ষায় তড়িৎক্ষেত্র এবং চৌম্বক ক্ষেত্রের মান এমন ভাবে নির্ধারিত করা হয় যে $X/H = \frac{1}{2}$ হয়। সুতরাং (13·1) সমীকরণ অনুযায়ী $\sin\theta = 1/2\beta$ হয়। যেহেতু $\beta = v/c$ এর উচ্চতম মান 1, অতএব $\theta$ কোণটির ন্যূনতম মান $30^\circ$ হয়। কারণ $\theta < 30^\circ$ হলে $\beta > 1$ হয়, যা অসম্ভব। সুতরাং উপরে বর্ণিত কৃষ্ণরেখাগুলি $0^\circ$ থেকে $180^\circ$ পর্যন্ত বিস্তৃত না হয়ে প্রকৃতপক্ষে $30^\circ$ থেকে $150^\circ$ পর্যন্ত বিস্তৃত ছিল।

এখানে বিশেষভাবে উল্লেখযোগ্য যে ফিল্‌মের উপরে উৎপন্ন কৃষ্ণরেখা দুটির উপরকার বিন্দুগুলি বিভিন্ন বেগ সম্পন্ন $\beta$-কণিকা দ্বারা উৎপন্ন হয়। যদি আপেক্ষিকতাবাদজনিত ইলেকট্রনের ভর পরিবর্তন বিবেচনা করা যায়, তাহলে (13·2) সমীকরণ থেকে $m = m_0/\sqrt{1-\beta^2}$ বসিয়ে পাওয়া যায়

$$\frac{e}{m_0} = \frac{2c^2 X d}{H^2(l^2 + d^2)} \cdot \frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}} \qquad (13{\cdot}2a)$$

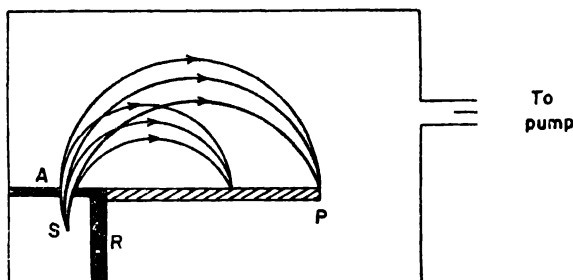
বুখারেরের পরীক্ষায় আলোকের বেগের সাত-দশমাংশ পর্যন্ত বেগ সম্পন্ন ($v \sim 0{\cdot}7c$) $\beta$-কণিকা নিয়ে পরীক্ষা করা হয়। আপেক্ষিকতাবাদ অনুসারে এইরূপ বেগ সম্পন্ন $\beta$-কণিকার ভর ইলেকট্রনের স্থির ভরের প্রায় 7/5 গুণ বেশী হওয়া উচিত। বুখারেরের পরীক্ষা থেকে বেগের সংগে $\beta$-কণিকার ভরবৃদ্ধির আপেক্ষিকতাবাদ অনুযায়ী প্রাপ্ত উপরে প্রদত্ত সূত্রের সত্যতা দৃঢ়ভাবে প্রতিষ্ঠিত হয়। (13·2$a$) সমীকরণের সাহায্যে স্থির $\beta$-কণিকার আপেক্ষিক আধান $e/m_0$ নির্ণয় করা যায়। এইভাবে প্রাপ্ত $e/m_0$ এবং অন্যান্য পদ্ধতিতে নিরূপিত ইলেকট্রনের আপেক্ষিক আধানের মানের মধ্যে ভাল সংগতি পাওয়া যায়।

বুখারেরের পরীক্ষা পদ্ধতি কিছু ত্রুটিপূর্ণ ছিল। পরবর্তী যুগে আরও অনেকে এইসব ত্রুটি পরিহার করে এবং খুব যত্ন সহকারে পরীক্ষা অনুষ্ঠিত করে বেগের সংগে $\beta$-কণিকার ভর পরিবর্তন খুব সঠিকভাবে পরিমাপ করেন এবং আপেক্ষিকতাবাদ থেকে প্রাপ্ত সূত্রের সংগে এই পরিবর্তনের সম্পূর্ণ

সংগতি প্রমাণ করেন। এই প্রসঙ্গে রোজার্স, ম্যাক্‌রেনল্‌ড্‌স এবং রোজার্সে'র (M. M. Rogers, A. W. McReynolds and F. T. Rogers) পরীক্ষা বিশেষভাবে উল্লেখযোগ্য। তাঁরা RaB এবং RaC মিশ্রণ থেকে নিঃসৃত বিভিন্ন সমবেগী অবস্থান্তরিত ইলেকট্রনগুচ্ছ (Conversion Electrons) ব্যবহার করেন ( 13·5 অনুচ্ছেদ দ্রষ্টব্য )। প্রথমে চৌম্বক ক্ষেত্র প্রয়োগ করে এদের ভরবেগ পরিমাপ করা হয়। পরে বিভিন্ন ইলেকট্রনগুচ্ছকে কৈন্দ্রিক তড়িৎক্ষেত্র দ্বারা বিচ্যুত করা হয়। নির্দিষ্ট তড়িৎক্ষেত্র প্রয়োগ করলে তবেই সমবেগী ইলেকট্রনগুচ্ছ এই কৈন্দ্রিক তড়িৎ-ক্ষেত্র পার হয়ে অপরদিকে নিঃসৃত হতে পারে। এই তড়িৎক্ষেত্র পরিমাপ করে $\beta$-কণিকাগুচ্ছের $e/m$ নির্ণয় করা হয়।

### 13·3 : $\beta$-কণিকার শক্তি নির্ণয়

কাওফ্‌মান এবং পরে বুখারের অনুষ্ঠিত পরীক্ষা থেকে সুস্পষ্টরূপে প্রতীয়মান হয় যে একই তেজস্ক্রিয় পদার্থ থেকে $\beta$-কণিকাগুলি নিরবচ্ছিন্ন ভাবে পরিবর্তনশীল (Continuously Variable) শক্তি বা বেগ সহকারে নিঃসৃত হয়। (12·5) অনুচ্ছেদে বর্ণিত চৌম্বক বর্ণালীলেখ (Magnetic Spectrograph) যন্ত্রের সাহায্যে $\beta$-কণিকার বেগ-বণ্টন (Velocity Distribution) নির্ণয় করা যায়।

রাদারফোর্ড এবং রবিনসন (Rutherford and Robinson) কর্তৃক উদ্ভাবিত এইরূপ একটি বর্ণালীলেখ যন্ত্র (13·7) চিত্রে প্রদর্শিত হয়েছে।

চিত্র 13·7

রাদারফোর্ড এবং রবিনসন কর্তৃক উদ্‌ভাবিত চৌম্বক বর্ণালীলেখ যন্ত্র।

S একটি খুব সূক্ষ্ম তার, যার উপরে $\beta$-নিঃসারক তেজস্ক্রিয় পদার্থ প্রলিপ্ত থাকে। S উৎস থেকে নিঃসৃত $\beta$-কণিকাগুলি একটি স্বল্প কোণে অপসারী

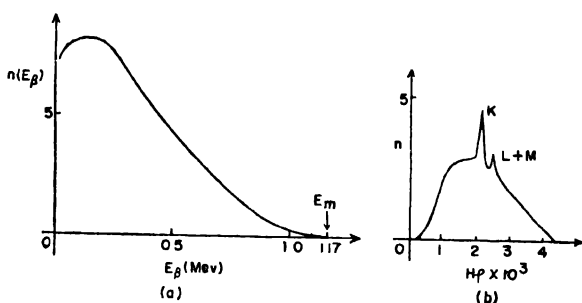
(Divergent) রশ্মিগুচ্ছ হিসাবে A রেখাছিদ্রের ভিতর দিয়ে নির্গত হয়। চিত্রতলের অভিলম্বে ক্রিয়াশীল চৌম্বক ক্ষেত্রের প্রভাবে $\beta$-কণিকাগুলির গতিপথ বৃত্তাকার হয়ে যায়। এইভাবে অর্ধবৃত্তাকার পথ পরিভ্রমণ করার পর রশ্মিগুচ্ছ মধ্যস্থ নির্দিষ্ট বেগ সম্পন্ন অপসারী $\beta$-রশ্মিগুলি P ফোটোগ্রাফিক প্লেটের উপরে নির্দিষ্ট বিন্দুতে একটি নাতিদীর্ঘ রেখা বরাবর ফোকাসিত হয়। এইভাবে তেজস্ক্রিয় পদার্থ থেকে নিঃসৃত বিভিন্ন বেগ সম্পন্ন $\beta$-কণিকাগুলি প্লেটের উপরকার বিভিন্ন সমান্তরাল রেখা বরাবর ফোকাসিত হয়। উৎস S থেকে যাতে $\beta$-কণিকাগুলি সোজাসুজি P প্লেটের উপরে আপতিত না হতে পারে সেইজন্য একটি সীসার চাদর (R) দ্বারা প্লেটটি আড়াল করা থাকে। সমগ্র যন্ত্রটি খুব নিম্ন বায়ুচাপ সম্পন্ন আধারের মধ্যে অবস্থিত থাকে।

যেহেতু $\beta$-কণিকাগুলির বেগ নিরবচ্ছিন্নভাবে পরিবর্তনশীল, অতএব উপরোক্ত ফোকাস রেখাগুলি ফোটোগ্রাফিক প্লেটের উপরে একটি নিরবচ্ছিন্ন বর্ণালীর সৃষ্টি করে। প্লেটটিকে বিকসিত করলে এই বর্ণালীর যে ফোটোগ্রাফ পাওয়া যায় তা ভালভাবে নিরীক্ষণ করলে দেখা যায় যে উৎস থেকে প্লেটের নিকটতম প্রান্ত এবং একটি নির্দিষ্ট বৃহত্তম দূরত্বের মধ্যবর্তী সমগ্র-অঞ্চলটি নিরবচ্ছিন্ন ভাবে কৃষ্ণায়িত (Blackened) হয়। প্লেটের উপরে বিভিন্ন অঞ্চলে অবশ্য এই কৃষ্ণতার গভীরতা পৃথক হয়। এর থেকে প্রতীয়মান হয় যে তেজস্ক্রিয় পদার্থ নিঃসৃত $\beta$-কণিকাগুলির বেগ এবং শক্তি শূন্য থেকে একটা বৃহত্তম মান পর্যন্ত নিরবচ্ছিন্নভাবে বিস্তৃত হয়। এইসব বিভিন্ন বেগ সম্পন্ন $\beta$-কণিকার তীব্রতা ভিন্ন হয়।

ফোটোগ্রাফিক প্লেটের বদলে একটি গাইগার-মূলার সংখ্যায়ক (Geiger Müller Counter) ব্যবহার করলে $\beta$-কণিকাগুলির সংখ্যা গণনা করা যায় (15·3 অনুচ্ছেদ দ্রষ্টব্য)। $v$ বেগে নিঃসৃত $\beta$-কণিকার উপরে $H$ চৌম্বক ক্ষেত্রের প্রভাবে ক্রিয়াশীল চৌম্বক বল এবং অভিকেন্দ্রিক বলের সমতা থেকে পাওয়া যায়

$$\frac{mv^2}{\rho} = \frac{Hev}{c}$$

অথবা $$p = mv = \frac{He\rho}{c}$$

এখানে $p=mv$ হচ্ছে $\beta$-কণিকার ভরবেগ (Momentum) এবং $\rho$ হচ্ছে এর ভ্রমণপথের ব্যাসার্ধ। স্পষ্টতঃ উচ্চ বেগ সম্পন্ন $\beta$-কণিকা সমূহ বৃহত্তর ব্যাসার্ধের বৃত্তপথে ভ্রমণ করে। অর্থাৎ সেগুলি উৎস S থেকে বেশী দূরত্বে ফোকাসিত হয়। গাইগার-মূলার সংখ্যায়কের অবস্থান পরিবর্তন করে বিভিন্ন বেগ সম্পন্ন $\beta$-কণিকার সংখ্যা নিরূপণ করা যায়। পূর্বেই উল্লেখ করা হয়েছে যে নির্দিষ্ট তেজস্ক্রিয় পদার্থ থেকে নিঃসৃত $\beta$-কণিকাগুলি ফোটোগ্রাফিক প্লেটের উপরে যে অঞ্চলে ফোকাসিত হয় তা উৎস S থেকে

চিত্র 13·8

$\beta$-কণিকার শক্তি বণ্টন চিত্র। ($a$) চিত্রে RaE নিঃসৃত নিরবচ্ছিন্ন $\beta$-বণ্টনের নিদর্শন দেখান হয়েছে। ($b$) চিত্রে $Au^{197}$ কেন্দ্রক নিঃসৃত $\beta$-বণ্টনের নিদর্শন দেখান হয়েছে। এই চিত্রে নিরবচ্ছিন্ন $\beta$-বণ্টনের উপরে কতকগুলি চূড়ার আবির্ভাব লক্ষণীয়। আরও লক্ষণীয় যে এই চিত্রে $X$-অক্ষ অভিমুখে $\beta$-শক্তির পরিবর্তে $\beta$-কণিকার ভরবেগের সমানুপাতিক $H\rho$ সংখ্যাটি নির্দেশিত হয়েছে।

একটা নির্দিষ্ট বৃহত্তম দূরত্ব পর্যন্ত বিস্তৃত হয়। অর্থাৎ এদের ভ্রমণপথের ব্যাসার্ধ একটা বৃহত্তম মান পর্যন্ত বিস্তৃত হয়। গাইগার-মূলার সংখ্যায়কের অবস্থান পরিবর্তন করেও এই তথ্যের সমর্থন পাওয়া যায়।

এখানে উল্লেখযোগ্য যে উপরে বর্ণিত পরীক্ষার সাহায্যে $\beta$-কণিকার ভরবেগ $p$ নিরূপিত হয়। এর থেকে আপেক্ষিকতাবাদ অনুসারে প্রাপ্ত (8·29) সমীকরণের সাহায্যে $\beta$-কণিকার মোট শক্তি $W$ পাওয়া যায়ঃ

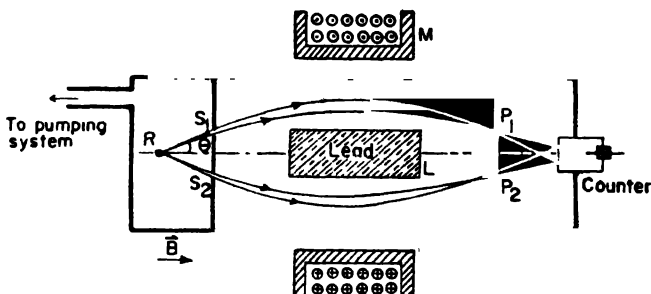
$$W^2 = p^2c^2 + m_0{}^2c^4$$

মোট শক্তি $W$ থেকে $\beta$-কণিকার গতিশক্তি $E_\beta$ নির্ণয় করা যায় :

$$E_\beta = W - m_0c^2 = \sqrt{p^2c^2 + m_0{}^2c^4} - m_0c^2 \quad (13\cdot3)$$

অর্থাৎ $E_\beta = \sqrt{H^2e^2\rho^2 + m_0{}^2c^4} - m_0c^2$ (13·4)

(13·8$a$ ও $b$) চিত্রে পরীক্ষার দ্বারা নির্ণিত $\beta$-কণিকার শক্তি বণ্টন লেখচিত্রাকারে প্রদর্শিত হয়েছে। চিত্রে ভুজ অভিমুখে $\beta$-কণিকার গতিশক্তি $E_\beta$ ( অথবা এর উপর নির্ভরশীল $H\rho$ ) এবং কোটি অভিমুখে নির্দিষ্ট গতিশক্তি সম্পন্ন $\beta$-কণিকার সংখ্যা $N(E_\beta)$ নির্দেশিত হয়েছে।

পরবর্তী যুগে $\beta$-কণিকার শক্তি বণ্টন নির্ণয়ের জন্য আরও উন্নত ধরনের নানাবিধ $\beta$-রশ্মি বর্ণালীলেখ যন্ত্র উদ্ভাবিত হয়। এর মধ্যে (Siegbahn) কর্তৃক উদ্ভাবিত যন্ত্রটি বিশেষ ভাবে উল্লেখযোগ্য। এই যন্ত্রে একটি নরম লৌহ নির্মিত বেলনের মধ্যে অবস্থিত সলিনয়েডের (Solenoid) মধ্য দিয়ে তড়িৎ প্রবাহ পাঠিয়ে একটি অক্ষীয় চৌম্বক ক্ষেত্র উৎপন্ন করা হয়। এই চৌম্বক ক্ষেত্রের মধ্যে একটি নিম্ন বায়ুচাপ সম্পন্ন আধারের ভিতরে এক প্রান্তে একটি ক্ষুদ্র $\beta$-উৎস স্থাপিত থাকে। অপর প্রান্তে অবস্থিত একটি ক্ষুদ্রায়তন গাইগার-মূলার সংখ্যায়কের সাহায্যে $\beta$-কণিকাগুলির সংখ্যা নিরূপণ করা হয়। উৎস থেকে যাতে $\beta$-কণিকাগুলি সরাসরি সংখ্যায়কের মধ্যে প্রবেশ করতে না

চিত্র 13·9

একটি আধুনিক ক্ষুদ্র লেন্স (Short lens) চৌম্বক বর্ণালীলেখ যন্ত্র।

পারে, সেজন্য এদের মধ্যে একটি সীসার পর্দা স্থাপিত থাকে। অক্ষের সংগে নির্দিষ্ট কোণে নিঃসৃত $\beta$-কণিকাসমূহ অক্ষীয় চৌম্বক ক্ষেত্রের প্রভাবে সর্পিল

(Helical) পথে অগ্রসর হয়ে সংখ্যায়কের অভ্র আচ্ছাদিত জানালার উপরে ফোকাসিত হয়। তড়িৎ প্রবাহ পরিবর্তিত করে চৌম্বক ক্ষেত্র পরিবর্তন করা যায়। এইভাবে চৌম্বক ক্ষেত্র পরিবর্তিত করে বিভিন্ন বেগ সম্পন্ন $\beta$-কণিকাসমূহকে সংখ্যায়কের উপরে ফোকাসিত করা হয় এবং তাদের সংখ্যা নিরূপিত করা হয়।

সীগবান বর্ণালীলেখ যন্ত্রের সাহায্যে $\beta$-কণিকার শক্তি বন্টন খুব সঠিকভাবে নিরূপণ করা সম্ভব। (13·9) চিত্রে একটি আধুনিক $\beta$-বর্ণালীলেখ যন্ত্রের নিদর্শন দেখান হয়েছে।

### 13·4 : $\beta$-রশ্মি বর্ণালীর প্রকৃতি

(13·8$a$) চিত্র থেকে দেখা যায় যে $\beta$-কণিকাগুলির শক্তি শূন্য থেকে একটা নির্দিষ্ট উচ্চতম মান পর্যন্ত নিরবিচ্ছিন্ন ভাবে বিস্তৃত হয়। এই উচ্চতম শক্তি $E_m$ বিভিন্ন তেজস্ক্রিয় পদার্থের ক্ষেত্রে ভিন্ন হয়। অনেক ক্ষেত্রে নিরবচ্ছিন্ন $\beta$-বর্ণালীর উপরে কয়েকটি তীক্ষ্ণ চূড়ার অস্তিত্ব দেখতে পাওয়া যায় (13·8$b$ চিত্র দ্রষ্টব্য)। এই চূড়াগুলি কতকগুলি নির্দিষ্ট শক্তিতে আবির্ভূত হয়। (13·8) চিত্রে প্রদর্শিত লেখচিত্র এবং শক্তি-অক্ষের অন্তর্গত ক্ষেত্রফল হচ্ছে নিঃসৃত $\beta$-কণিকাগুলির মোট সংখ্যার সংগে সমানুপাতিক। (13·8$b$) চিত্রে বিভিন্ন চূড়াগুলির অন্তর্গত ক্ষেত্রফলের মান নিরবচ্ছিন্ন লেখচিত্রের অন্তর্গত ক্ষেত্রফলের তুলনায় সাধারণতঃ খুব কম হয়। প্রথমোক্ত ক্ষেত্রফল দ্বিতীয়টির শতকরা মাত্র কয়েক ভাগের বেশী হয় না। অর্থাৎ চূড়া উৎপাদক $\beta$-কণিকার সংখ্যা নিরবচ্ছিন্ন শক্তি সম্পন্ন কণিকার সংখ্যার তুলনায় সাধারণতঃ অনেক কম হয়। $\beta$-বর্ণালীর উপরে বর্ণিত প্রকৃতি সাধারণভাবে সকল $\beta$-নিঃসারক পদার্থের ক্ষেত্রেই দেখতে পাওয়া যায়।

### 13·5 : $\beta$-রশ্মি চূড়াগুলির উৎপত্তির কারণ

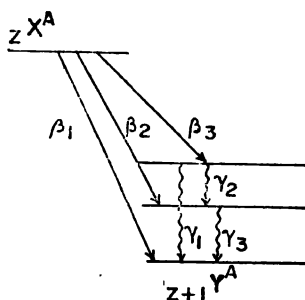
খুব যত্ন সহকারে পরীক্ষা করে দেখা যায় যে একটি তেজস্ক্রিয় পদার্থের মধ্যে যতগুলি পরমাণুর $\beta$-বিঘটন ($\beta$-Disintegration) হয়, $\beta$-বর্ণালী থেকে প্রাপ্ত মোট ইলেকট্রনের সংখ্যা, অর্থাৎ নিরবচ্ছিন্ন শক্তিশালী এবং চূড়া উৎপাদনকারী ইলেকট্রনের মোট সংখ্যা তার চাইতে অল্প বেশী হয়। অপরপক্ষে শুধু নিরবচ্ছিন্ন শক্তি সম্পন্ন $\beta$-কণিকার সংখ্যা বিঘটিত পরমাণু সংখ্যার সমান হয়। এর থেকে বোঝা যায় যে পরমাণু কেন্দ্রকের

$\beta$-বিঘটনের ফলে কেবল এই শেষোক্ত প্রকার $\beta$-কণিকাই নিঃসৃত হয়। চূড়া উৎপাদনকারী গৌণ ইলেকট্রনগুলি (Secondary Electrons) নিঃসৃত হয় অন্য কারণে।

রাদারফোর্ড এবং তাঁর সহযোগীবৃন্দ সর্বপ্রথম পরীক্ষার দ্বারা প্রমাণ করেন যে এই গৌণ ইলেকট্রনগুলি তেজস্ক্রিয় পরমাণুর কেন্দ্রক থেকে নিঃসৃত হয় না। এই ইলেকট্রনগুলি নির্দিষ্ট শক্তি সম্পন্ন হয়, একথা উপরে উল্লেখ করা হয়েছে। এদের উৎপত্তি নিম্নলিখিত উপায়ে ব্যাখ্যা করা যায়।

কোন তেজস্ক্রিয় কেন্দ্রকের $\beta$-বিঘটনের পরে অবশিষ্ট কেন্দ্রকটি ভৌম অথবা উত্তেজিত অবস্থায় সৃষ্ট হতে পারে। যদি এটি উত্তেজিত অবস্থায় সৃষ্ট হয়, তাহলে পরমুহূর্তে ($10^{-13}$ সেকেণ্ডের মধ্যে) কেন্দ্রকটি উত্তেজিত শক্তিস্তর থেকে নিম্নতর শক্তিস্তরসমূহে সংক্রমিত হতে পারে। এইরূপ সংক্রমণ যখন ঘটে তখন কেন্দ্রক থেকে নির্দিষ্ট শক্তি বা তরঙ্গদৈর্ঘ্য সম্পন্ন $\gamma$-রশ্মি নিঃসৃত হতে পারে। যদি কেন্দ্রকের শক্তিস্তর দুটির শক্তি হয় $\varepsilon_1$ এবং $\varepsilon_2$ এবং নিঃসৃত $\gamma$ রশ্মির কম্পাংক $\nu$ ( বা তরঙ্গদৈর্ঘ্য $\lambda$ ) হয়, তাহলে আমরা পাই

$$h\nu = h\frac{c}{\lambda} = \varepsilon_1 - \varepsilon_2 \tag{13·5}$$

নির্দিষ্ট উত্তেজিত শক্তিস্তর থেকে বিভিন্ন নিম্নতর স্তরে সংক্রমণের ফলে

চিত্র 13·10

$\beta$-বিঘটনের সংগে সংশ্লিষ্ট $\gamma$-রশ্মির উৎপত্তি।

$\nu_1, \nu_2, \nu_3$ ইত্যাদি কম্পাংক ( বা $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ ইত্যাদি তরঙ্গদৈর্ঘ্য ) সম্পন্ন $\gamma$-রশ্মি ( যথা $\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3$ ) নিঃসৃত হতে পারে ( 13·10 চিত্র দ্রষ্টব্য )।

কোন কোন ক্ষেত্রে উত্তেজিত কেন্দ্রকটি $\gamma$-রশ্মি নিঃসরণের পরিবর্তে তার অতিরিক্ত শক্তি কেন্দ্রক বহির্ভূত একটি কক্ষীয় ইলেকট্রনকে হস্তান্তরিত করে নিম্নতর শক্তিস্তরে সংক্রমিত হতে পারে। যদি এই হস্তান্তরিত শক্তির মান পরমাণুর উক্ত কক্ষীয় ইলেকট্রনের বন্ধন শক্তি (Binding Energy) অপেক্ষা বেশী হয়, তাহলে ইলেকট্রনটি পরমাণুর বন্ধন কাটিয়ে নিঃসৃত হতে পারে। যখন এইরূপ ঘটে তখন কেন্দ্রকের এক শক্তিস্তর থেকে অন্য স্তরে সংক্রমণের ফলে কোন $\gamma$-রশ্মি নিঃসৃত হয় না ; তার পরিবর্তে নির্দিষ্ট শক্তি সম্পন্ন একটি ইলেকট্রন নিঃসৃত হয়। যদি পরমাণুর মধ্যে ইলেকট্রনটির বন্ধন শক্তি হয় $W$ তাহলে সংক্রমণের ফলে প্রাপ্ত মোট শক্তির মধ্যে $W$ পরিমাণ শক্তি ইলেকট্রনটিকে নিঃসৃত করতে ব্যয়িত হয়, বাকী শক্তি ইলেকট্রনটি গতিশক্তি হিসাবে পায়। স্পষ্টতঃ এই গতিশক্তি হয়

$$E = (\varepsilon_1 - \varepsilon_2) - W$$

যেহেতু $\varepsilon_1 - \varepsilon_2 = h\nu$ হচ্ছে নিঃসৃত $\gamma$-রশ্মির শক্তি ( যখন $\gamma$-রশ্মি নিঃসৃত হয় ), অতএব আমরা পাই

$$E = h\nu - W \tag{13·6}$$

স্পষ্টতঃ এইরূপ সংক্রমণের ফলে ইলেকট্রনগুলি নির্দিষ্ট গতিশক্তি সহকারে নিঃসৃত হয়। এই ধরনের ইলেকট্রন নিঃসরণকে বলা হয় 'আভ্যন্তরীণ অবস্থান্তর প্রক্রিয়া' (Internal Conversion Process) এবং এইভাবে নিঃসৃত ইলেকট্রন সমূহকে বলা হয় 'আভ্যন্তরীণ অবস্থান্তরিত ইলেকট্রন' (Internal Conversion Electrons)।

যেহেতু পরমাণুর K ইলেকট্রনগুলি কেন্দ্রকের সর্বাপেক্ষা নিকটে অবস্থিত কক্ষপথে আবর্তন করে, সুতরাং এই ইলেকট্রনগুলিই কেন্দ্রক দ্বারা সর্বাপেক্ষা বেশী প্রভাবিত হয়। অর্থাৎ কেন্দ্রকের উপরোক্ত সংক্রমণের ফলে K ইলেকট্রন নিঃসৃত হবার সম্ভাব্যতা সর্বাপেক্ষা বেশী হয়। যদি পরমাণুর মধ্যে K ইলেকট্রনের বন্ধন শক্তি হয় $W_K$, তাহলে নিঃসৃত K অবস্থান্তরিত ইলেকট্রনের (K Conversion Electron) গতিশক্তি হয়

$$E_K = (\varepsilon_1 - \varepsilon_2) - W_K = h\nu - W_K \tag{13·7}$$

অনুরূপে L-কক্ষপথে ইলেকট্রনের বন্ধন শক্তি যদি হয় $W_L$, তাহলে L অবস্থান্তরিত ইলেকট্রনের গতিশক্তি হয়

$$E_L = (\varepsilon_1 - \varepsilon_2) - W_L = h\nu - W_L \tag{13·8}$$

এদের সংখ্যা K অবস্থান্তরিত ইলেকট্রনের তুলনায় অনেক কম হয়। $\beta$-বর্ণালীর চূড়াগুলি ভালভাবে লক্ষ্য করলে অনেক সময় প্রধান চূড়ার পাশে আর একটি অনুচ্চ চূড়া দেখতে পাওয়া যায়। প্রধান চূড়াটি সাধারণতঃ K ইলেকট্রন নিঃসরণের ফলে উৎপন্ন হয়, আর পাশের অনুচ্চ চূড়াটি L ইলেকট্রন নিঃসরণের ফলে উৎপন্ন হয়।

যেহেতু $W_K > W_L$ হয়, সুতরাং $E_K < E_L$ হয়, অর্থাৎ অনুচ্চ L চূড়াটি K চূড়া অপেক্ষা উচ্চতর শক্তিতে আবির্ভূত হয়। দুটি চূড়ার অবস্থানের পার্থক্য পরমাণুর মধ্যে K এবং L ইলেকট্রনের বন্ধনশক্তির পার্থক্যের, অর্থাৎ $(W_K - W_L)$ সংখ্যাটির সমান হয়।

এখানে বিশেষভাবে উল্লেখযোগ্য যে অবস্থান্তরিত ইলেকট্রনগুলি নিঃসৃত হয় $\beta$-বিঘটনের ফলে সৃষ্ট অবশিষ্ট মৌল থেকে। অর্থাৎ $W_K, W_L$ প্রভৃতি সংখ্যাগুলি হচ্ছে অবশিষ্ট পরমাণুর কক্ষীয় ইলেকট্রনগুলির বন্ধন শক্তি ; আদি পরমাণুর নয়।

$\beta$-বিঘটনের ফলে উত্তেজিত অবস্থায় সৃষ্ট কেন্দ্রকটি হয় $\gamma$-রশ্মি না হয় অবস্থান্তরিত ইলেকট্রন নিঃসৃত করে নিম্নতর শক্তিস্তরে সংক্রমিত হতে পারে। যদি মোট $N$ সংখ্যক কেন্দ্রক এইভাবে $\beta$-বিঘটিত হয় এবং এদের মধ্যে $N_\gamma$ সংখ্যক ক্ষেত্রে সৃষ্ট কেন্দ্রকটি $\gamma$-রশ্মি নিঃসরণ করে ও $N_e$ সংখ্যক ক্ষেত্রে সেটি অবস্থান্তরিত ইলেকট্রন (Conversion Electron) নিঃসরণ করে নিম্নতর শক্তিস্তরে সংক্রমিত হয় তাহলে স্পষ্টতঃ

$$N_\gamma + N_e = N$$

$N_e$ এবং $N_\gamma$ এই দুটি সংখ্যার অনুপাতকে বলা হয় 'অবস্থান্তর গুণাংক' (Conversion Coefficient)। এই গুণাংককে সাধারণতঃ $\alpha$ চিহ্ন দ্বারা নির্দেশিত করা হয়। অর্থাৎ

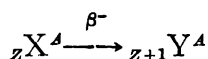
$$\alpha = N_e / N_\gamma \qquad (13\cdot9)$$

নির্দিষ্ট তেজস্ক্রিয় পদার্থের ক্ষেত্রে $\alpha$-সংখ্যাটির নির্দিষ্ট মান থাকে। K কক্ষপথ থেকে অবস্থান্তরিত ইলেকট্রন নিঃসরণের ক্ষেত্রে অবস্থান্তর-গুণাংক $\alpha_K$ সংখ্যাটির মান সাধারণতঃ সর্বাপেক্ষা বেশী হয়। কোন কোন তেজস্ক্রিয় পদার্থের ক্ষেত্রে কেবল $\gamma$-রশ্মিই নিঃসৃত হয়, অবস্থান্তরিত ইলেকট্রন নিঃসৃত হয় না, অর্থাৎ $N_\gamma = N$ ও $N_e = 0$ হয় ; আবার কোন কোন ক্ষেত্রে ঠিক এর

বিপরীত ঘটে, অর্থাৎ $N_\gamma = 0$ ও $N_e = N$ হয়। অতএব $\alpha$ সংখ্যাটির মান 0 থেকে $\infty$ পর্যন্ত বিস্তৃত হতে পারে। সাধারণতঃ সংক্রমণের ফলে কেন্দ্রকের শক্তি পরিবর্তন $(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)$ যত কম হয় এবং দুটি শক্তিস্তরের কোয়ানটাম সংখ্যার পরিবর্তন যত বেশী হয় অবস্থান্তর গুণাংক $\alpha$ তত উচ্চ হয়। তাছাড়া নিঃসারক কেন্দ্রকের পরমাণবিক সংখ্যার উপরেও $\alpha$ নির্ভর করে ; $\alpha \propto Z^3$ হয়। অর্থাৎ উচ্চ পরমাণবিক সংখ্যা সম্পন্ন কেন্দ্রকের সংক্রমণের ক্ষেত্রে $\gamma$-রশ্মির পরিবর্তে অবস্থান্তরিত ইলেকট্রন নিঃসরণের সম্ভাব্যতা বেশী হয়, বিশেষতঃ যদি সংক্রমণের ফলে কেন্দ্রকের শক্তি পরিবর্তন খুব কম হয়।

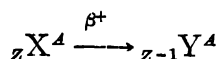
### 13·6 : নিরবচ্ছিন্ন শক্তি সম্পন্ন $\beta$-রশ্মি বর্ণালীর উৎপত্তির কারণ

$\beta$-নিঃসরণের ফলে পরমাণুর ভর-সংখ্যা $A$ পরিবর্তিত হয় না, এর পরমাণবিক সংখ্যা $Z$ পরিবর্তিত হয়। প্রাকৃতিক তেজস্ক্রিয় পদার্থ থেকে নিঃসৃত $\beta$-কণিকাগুলি ইলেকট্রন থেকে অভিন্ন। এদের সাধারণতঃ $\beta^-$ চিহ্ন দ্বারা নির্দেশিত করা হয়। $\beta^-$ নিঃসরণের ফলে পরমাণবিক সংখ্যা $Z$ এক একক পরিমাণে বৃদ্ধি পায় ; অর্থাৎ যদি $X^A$ পরমাণু $\beta^-$ বিঘটনের ফলে $Y^A$ পরমাণুতে রূপান্তরিত হয়, তাহলে আমরা লিখতে পারি

$$_Z X^A \xrightarrow{\beta^-} {}_{Z+1}Y^A$$

উদাহরণস্বরূপ $P^{32}(Z=15)$ পরমাণু $\beta^-$ বিঘটনের ফলে $S^{32}$ $(Z=16)$ পরমাণুতে রূপান্তরিত হয়।

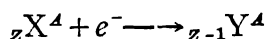
কৃত্রিম উপায়ে সৃষ্ট তেজস্ক্রিয় পরমাণুর ক্ষেত্রে অনেক সময় $\beta^-$ নিঃসরণের পরিবর্তে পজিট্রন (Positron) নামক এক প্রকার ধনাত্মক আধানবাহী কণিকা নিঃসৃত হতে দেখা যায় (17·10 অনুচ্ছেদ দ্রষ্টব্য)। পজিট্রনগুলি ইলেকট্রনেরই সমগোত্রীয়। এদের ভর ইলেকট্রনের ভরের সমান ; এদের ধনাত্মক আধান ইলেকট্রনের ঋণাত্মক আধানের সমান হয়। এগুলিকে সাধারণতঃ $\beta^+$ চিহ্ন দ্বারা নির্দেশিত করা হয়। পজিট্রনগুলিকে ইলেকট্রনের বিপরীত কণিকা (Anti Particles) আখ্যা দেওয়া হয়। পজিট্রনের আবিষ্কার এবং এদের ধর্মাবলী সম্বন্ধে পরে (20·6) অনুচ্ছেদে আলোচনা করা হবে। পজিট্রন নিঃসরণের ফলে কেন্দ্রকের ভর-সংখ্যা $A$ পরিবর্তিত হয় না, কেবল এর পরমাণবিক সংখ্যা

$Z$ এক একক পরিমাণে হ্রাস পায়। যদি $X^A$ পরমাণু পজিট্রন নিঃসরণের ফলে $Y^A$ পরমাণুতে রূপান্তরিত হয়; তাহলে আমরা লিখতে পারি ঃ

$$_{Z}X^{A} \xrightarrow{\beta^{+}} {}_{Z-1}Y^{A}$$

উদাহরণস্বরূপ $O^{15}(Z=8)$ পরমাণু $\beta^+$ বিঘটনের ফলে $N^{15}$ $(Z=7)$ পরমাণুতে রূপান্তরিত হয়।

তেজস্ক্রিয় পরমাণু থেকে ইলেকট্রন বা পজিট্রন নিঃসরণ, উভয় প্রকার প্রক্রিয়াকেই বলা হয় $\beta$-বিঘটন ($\beta$ Disintegration)। ইলেকট্রন এবং পজিট্রন উভয় প্রকার কণিকাকেই $\beta$ কণিকা আখ্যা দেওয়া হয়।

উপরোক্ত দুই প্রকার $\beta$-বিঘটন ছাড়া আরও এক প্রকার $\beta$-বিঘটন প্রক্রিয়ার কথা জানা আছে। কোন কোন ক্ষেত্রে একটি তেজস্ক্রিয় পরমাণু-কেন্দ্রক একটি কক্ষীয় ইলেকট্রন আহরণ করে রূপান্তরিত হতে পারে। এই প্রক্রিয়াকে বলা হয় 'কক্ষীয় ইলেকট্রন-আহরণ' (Orbital Electron Capture)। এর ফলে কেন্দ্রকের ধনাত্মক আধান এক একক পরিমাণে হ্রাস পায়, অর্থাৎ পরমাণুটির পরমাণবিক সংখ্যা $Z$ এক একক কমে যায়। ভর-সংখ্যা অবশ্য অপরিবর্তিত থাকে। যদি পূর্বের মত ধরা যায় যে $X^A$ পরমাণুর কেন্দ্রক একটি কক্ষীয় ইলেকট্রন আহরণ করার ফলে $Y^A$ পরমাণুতে রূপান্তরিত হয়, তাহলে লেখা যায়

$$_{Z}X^{A} + e^{-} \longrightarrow {}_{Z-1}Y^{A}$$

উদাহরণস্বরূপ $Be^7(Z=4)$ পরমাণু একটি K-কক্ষীয় ইলেকট্রন আহরণ করে $Li^7(Z=3)$ পরমাণুতে রূপান্তরিত হয়। স্পষ্টতঃ কক্ষীয় ইলেকট্রন আহরণের ফলে সৃষ্ট পরমাণু এবং পজিট্রন নিঃসরণের ফলে সৃষ্ট পরমাণু পরস্পরের সমরূপী।

$\beta$-বিঘটনের ফলে নিঃসৃত কণিকা ইলেকট্রনই হোক বা পজিট্রনই হোক, নিঃসৃত কণিকাগুলির শক্তিবণ্টন সমরূপী হয়। উভয় ক্ষেত্রেই $\beta$-কণিকাগুলি শূন্য থেকে একটা নির্দিষ্ট উচ্চতম মান পর্যন্ত বিস্তৃত শক্তি সহকারে নিঃসৃত হয়। ইলেকট্রন আহরণের ক্ষেত্রে অবশ্য কোন কণিকা নিঃসৃত হতে দেখা যায় না; এক্ষেত্রে নির্দিষ্ট শক্তি সম্পন্ন বৈশিষ্ট্যপূর্ণ (Characteristic) X-রশ্মি ফোটন নিঃসৃত হতে দেখা যায় (13·10 অনুচ্ছেদ দ্রষ্টব্য)।

ইতিপূর্বে উল্লেখ করা হয়েছে যে পরমাণু কেন্দ্রক কতকগুলি প্রোটন এবং নিউট্রন দ্বারা গঠিত। এর মধ্যে ইলেকট্রন (বা পজিট্রন) থাকে না। $\beta$-বিঘটনের সময় কোন কোন কেন্দ্রকের মধ্যে একটি নিউট্রন স্থায়ীভাবে একটি প্রোটনে রূপান্তরিত হয়, যার ফলে বিঘটন কালে কেন্দ্রকের মধ্যে মুহূর্তের জন্য একটি ইলেকট্রন ($\beta^-$) সৃষ্ট হয়ে কেন্দ্রক থেকে নিঃসৃত হয়। অনুরূপে কোন কোন কেন্দ্রকের মধ্যে একটি প্রোটন স্থায়ীভাবে একটি নিউট্রনে রূপান্তরিত হয়, যার ফলে মুহূর্তের জন্য কেন্দ্রকের মধ্যে একটি পজিট্রন ($\beta^+$) সৃষ্ট হয়ে কেন্দ্রক থেকে নিঃসৃত হয়। $\alpha$-বিঘটন আলোচনা কালে আমরা দেখেছি যে তেজস্ক্রিয় কেন্দ্রক থেকে সমশক্তি সম্পন্ন এক বা একাধিক $\alpha$-রশ্মিগুচ্ছ নিঃসৃত হয়। এর থেকে প্রতীয়মান হয় যে পরমাণু-কেন্দ্রকের মধ্যে কতকগুলি অবচ্ছিন্ন (Discrete) শক্তিস্তর থাকে (12·16 অনুচ্ছেদ দ্রষ্টব্য)। কেন্দ্রক থেকে নিঃসৃত $\gamma$-রশ্মির প্রকৃতি নিরীক্ষণ করেও ঠিক একই সিদ্ধান্তে উপনীত হওয়া যায় (14·9 অনুচ্ছেদ দ্রষ্টব্য)। স্বভাবতঃই আশা করা যায় যে এইরূপ অবচ্ছিন্ন শক্তিস্তরে অবস্থিত একটি নির্দিষ্ট কেন্দ্রক যখন $\beta$-বিঘটনের ফলে আর একটি নূতন অবচ্ছিন্ন শক্তিস্তরে অবস্থিত নির্দিষ্ট কেন্দ্রকে রূপান্তরিত হয়, তখন $\beta$-কণিকাসমূহ সব সমান শক্তি সহকারে নিঃসৃত হবে। এই শক্তির মান দুটি কেন্দ্রকের ভরের পার্থক্য থেকে পাওয়া যায়। কিন্তু আমরা উপরের আলোচনায় দেখেছি যে $\beta$-কণিকাগুলি সব সমান শক্তি সহকারে নিঃসৃত হয় না, এদের শক্তি নির্দিষ্ট সীমার মধ্যে (0 থেকে $E_m$ পর্যন্ত) বিস্তৃত হয়। অর্থাৎ $\alpha$ এবং $\gamma$ নিঃসরণ সম্বন্ধীয় পরীক্ষালব্ধ সিদ্ধান্ত এবং $\beta$-বিঘটন সম্বন্ধীয় পরীক্ষালব্ধ সিদ্ধান্তের মধ্যে একটা গুরুতর অসংগতি থেকে যায়।

এই অসংগতির কারণ ব্যাখ্যা করতে গিয়ে বোর (Niels Bohr) প্রস্তাব করেন যে $\beta$-বিঘটনের ক্ষেত্রে সম্ভবতঃ শক্তি সংরক্ষণ সূত্র (Energy Conservation Law) মান্য হয় না। অর্থাৎ যদিও আদি এবং অবশিষ্ট কেন্দ্রক দুটির মধ্যে নির্দিষ্ট পরিমাণ শক্তি ব্যবধান থাকে, নিঃসৃত $\beta$-কণিকাগুলির শক্তি সব সময়ে এই ব্যবধানের সমান হয় না। বোরের এই প্রস্তাব সত্য হলে পদার্থবিদ্যার সমগ্র তাত্ত্বিক ভিত্তির পরিবর্তন আবশ্যক হয়ে পড়ে।

অপরপক্ষে পাউলি (Pauli) ১৯৩১ সালে একটি বিকল্প প্রস্তাব করেন। তাঁর মতে $\beta$-বিঘটনের সময়ে $\beta$-কণিকা ছাড়া আর একটি অদৃশ্য

কণিকা একই সংগে নিঃসৃত হয়। ফলে আদি এবং অবশিষ্ট কেন্দ্রকের শক্তি ব্যবধান এই দুটি কণিকার মধ্যে বণ্টিত হয় এবং সেইজন্য $\beta$-কণিকাটি শূন্য থেকে উচ্চতম মান $E_m$ পর্যন্ত বিস্তৃত সীমার মধ্যে যে কোন শক্তি সহকারে নিঃসৃত হতে পারে। স্পষ্টতঃ $\beta$-কণিকার শক্তি যখন শূন্য হয়, অন্য কণিকাটির শক্তি তখন $E_m$ হয়; অপরপক্ষে $\beta$-কণিকার শক্তি যখন $E_m$ হয়, অন্য কণিকাটির শক্তি তখন শূন্য হয়। সাধারণভাবে যদি নিঃসৃত $\beta$-কণিকার শক্তি হয় $E_\beta$ এবং অন্য কণিকাটির শক্তি হয় $E_\nu$, তাহলে আমরা লিখতে পারি

$$E_m = E_\beta + E_\nu \tag{13·10}$$

এখানে অবশ্য অবশিষ্ট কেন্দ্রকটির প্রতিক্ষেপ শক্তি (Recoil Energy) উপেক্ষা করা হয়েছে কারণ উক্ত কেন্দ্রকটির ভর নিঃসৃত কণিকা দুটির ভরের তুলনায় অনেক বেশী হয়। মোট শক্তি $E_m$ আদি এবং অবশিষ্ট কেন্দ্রকদ্বয়ের শক্তি-ব্যবধান দ্বারা নির্ধারিত হয় (13·7 অনুচ্ছেদ দ্রষ্টব্য)। পাউলির মতবাদ ঠিক বলে ধরে নিলে $\beta$-বিঘটনের ক্ষেত্রে শক্তি সংরক্ষণ এবং ভরবেগ সংরক্ষণ সূত্রের প্রয়োগ সম্বন্ধে সন্দেহের কোন অবকাশ থাকে না।

পাউলি কল্পিত অদৃশ্য কণিকাটিকে বলা হয় 'নিউট্রিনো' (Neutrino)। নিউট্রিনোর প্রকৃতি কীরূপ হওয়া উচিত সে সম্বন্ধে আমরা কিছু কিছু জল্পনা করতে পারি।

নিউট্রিনো কণিকাটি আধানশূন্য হওয়া উচিত। এর ভরও প্রায় শূন্য হওয়া উচিত। কারণ দেখা যায় যে $\beta$-কণিকাটি যখন উচ্চতম শক্তি সহকারে নিঃসৃত হয়, তখন নিঃসৃত শক্তির মান ($E_m$) আদি ও অবশিষ্ট কেন্দ্রকদ্বয়ের ভর ব্যবধানের সমপরিমাণ শক্তির সমান হয়। তাছাড়া $h/2\pi$ এককে পরিমিত নিউট্রিনোর ঘূর্ণন কৌণিক ভরবেগ (Spin Angular Momentum) $s = \frac{1}{2}$ হওয়া উচিত। জানা আছে যে কেন্দ্রকের প্রোটন ও নিউট্রনগুলির প্রত্যেকটির ঘূর্ণন কৌণিক ভরবেগ $\frac{1}{2}$ হয়। কেন্দ্রকের কৌণিক ভরবেগের মান কেন্দ্রকে বর্তমান প্রোটন-নিউট্রনের মোট সংখ্যার (ভর-সংখ্যার) উপর নির্ভর করে। এই সংখ্যা $A$ যদি জোড় হয়, তাহলে কেন্দ্রকের কৌণিক ভরবেগ $h/2\pi$ সংখ্যাটির পূর্ণ গুণিতক (Integral Multiple) হয়। অপরপক্ষে $A$ যদি বিজোড় হয় তাহলে উক্ত কৌণিক ভরবেগ $h/2\pi$ সংখ্যাটির অর্ধপূর্ণ গুণিতক (Half Integral

Multiple) হয়। $\beta$-বিঘটনের পরে কেন্দ্রকের মধ্যে বর্তমান মোট প্রোটন-নিউট্রন সংখ্যা অপরিবর্তিত থাকে। সুতরাং আদি কেন্দ্রকের কৌণিক ভরবেগ যদি পূর্ণ সংখ্যা ( অর্থাৎ $h/2\pi$ এর পূর্ণ গুণিতক ) হয়, তাহলে $\beta$-বিঘটনের ফলে সৃষ্ট অবশিষ্ট কেন্দ্রকের কৌণিক ভরবেগও পূর্ণ সংখ্যা হবে। অনুরূপে আদি কেন্দ্রকের কৌণিক ভরবেগ যদি অর্ধপূর্ণ সংখ্যা হয়, অবশিষ্ট কেন্দ্রকটির কৌণিক ভরবেগও অর্ধপূর্ণ সংখ্যা হবে। অর্থাৎ $\beta$-বিঘটনের ফলে কেন্দ্রকের কৌণিক ভরবেগ হয় অপরিবর্তিত থাকবে, না হয় এর পরিবর্তনের মান পূর্ণ সংখ্যা হবে। যেহেতু নিঃসৃত $\beta$-কণিকার ঘূর্ণন কৌণিক ভরবেগ 1/2 হয় সুতরাং নিঃসৃত অপর কণিকাটির ( অর্থাৎ নিউট্রিনোর ) ঘূর্ণন কৌণিক ভরবেগও 1/2 হবে।

পাউলির নিউট্রিনো মতবাদের উপর ভিত্তি করে প্রখ্যাত ইতালীয়ান বিজ্ঞানী ফের্মি (Enrico Fermi) ১৯৩৪ সালে $\beta$-কণিকার শক্তি বণ্টনের প্রকৃতি ব্যাখ্যা করতে সমর্থ হন। ফের্মি উদ্ভাবিত $\beta$-বিঘটন তত্ত্ব অবশ্য খুব জটিল এবং বর্তমান গ্রন্থের আলোচনা বহির্ভূত।

ফের্মির $\beta$-বিঘটন তত্ত্ব থেকে নিঃসৃত $\beta$-কণিকা সমূহের শক্তি ( বা ভরবেগ ) বণ্টনের গাণিতিক সূত্র পাওয়া যায়। যদি $\beta$-বিঘটনের ফলে কেন্দ্রকের কৌণিক ভরবেগ কোয়ানটাম সংখ্যা $I$ এর কোন পরিবর্তন না হয় বা মাত্র এক একক পরিবর্তন হয় ($\triangle I = 0, \pm 1$ ) তাহলে $\beta$-বিঘটনকে অনুমোদিত $\beta$-সংক্রমণ (Allowed $\beta$-Transition) বলা হয়। এক্ষেত্রে $\beta$-বিঘটনের সম্ভাব্যতা (Probability) সর্বাপেক্ষা বেশী হয়। এইরূপ অনুমোদিত সংক্রমণের ক্ষেত্রে $p$ এবং $p+dp$ ভরবেগ সীমার মধ্যে নিঃসৃত $\beta$-কণিকার সংখ্যা ফের্মি তত্ত্বের সাহায্যে পাওয়া যায় :

$$N(p)dp = AF(Z,p)p^2(E_m - E_\beta)^2 dp \qquad (13\cdot11)$$

এখানে $p$ এবং $E_\beta$ হচ্ছে যথাক্রমে $\beta$-কণিকার ভরবেগ এবং গতিশক্তি। $E_m$ হচ্ছে নিঃসৃত $\beta$-কণিকার উচ্চতম গতিশক্তি। $A$ একটি ধ্রুবক। $F(Z,p)$ হচ্ছে ফের্মি-অপেক্ষক যা নির্ভর করে নিঃসৃত $\beta$-কণিকা কর্তৃক অনুভূত কেন্দ্রকের আধান জনিত বলের উপরে।

যদি $\beta$-কণিকার মোট শক্তি $W$ হয়, তাহলে যেহেতু $W = E_\beta + m_0c^2$, অতএব $dW = dE_\beta$ হয়। আবার যেহেতু

$$W^2 = p^2c^2 + m_0^2c^4$$

অতএব $\quad WdW = c^2 p dp$

আবার যদি $W_m = E_m + m_0c^2$ হয় উচ্চতম মোট $\beta$-শক্তি, তাহলে লেখা যায়

$$E_m - E_\beta = W_m - W$$

সুতরাং (13·11) সমীকরণ থেকে পাওয়া যায়

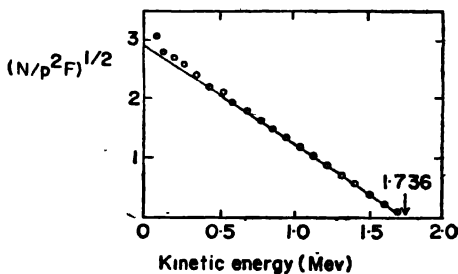
$$N(W)dW = N(p)dp = CF(Z,p)pW(E_m - E_\beta)^2 dW$$

অতএব

$$N(E_\beta)dE_\beta = N(W)dW$$
$$= CF(Z,p)p(E_\beta + m_0c^2)(E_m - E_\beta)^2 dE_\beta$$

এখানে $C$ একটি ধ্রুবক।

নিম্ন $Z$ এর ক্ষেত্রে $F(Z,p)$ প্রায় ধ্রুবক হয় এবং এক্ষেত্রে শূন্য গতিশক্তি ($E_\beta = 0$, $p = 0$) সম্পন্ন $\beta$-কণিকার সংখ্যা শূন্য হয়। অপর পক্ষে উচ্চতর $Z$ সম্পন্ন কেন্দ্রকের ক্ষেত্রে $F(Z,p)$ ধ্রুবক হয় না। এর ফলে নিম্নতর শক্তি সম্পন্ন $\beta^-$ কণিকার সংখ্যা অপেক্ষাকৃত বেশী হয় এবং শূন্য গতিশক্তি সম্পন্ন $\beta^-$ কণিকার সংখ্যা শূন্য হয় না। অপরপক্ষে $F(Z,p)$ এর প্রভাবে নিম্নশক্তি $\beta^+$ কণিকার সংখ্যা অপেক্ষাকৃত অনেক কম হয়।

উল্লেখযোগ্য যে গতিশক্তির পরিবর্তে যদি ভরবেগ $p$-এর সংগে নিঃসৃত $\beta$-কণিকা সংখ্যার পরিবর্তনের লেখচিত্র আঁকা যায়, তাহলে $F(Z,p)$ এর

চিত্র 13·11

$O^{15}$ কেন্দ্রক নিঃসৃত $\beta^+$ কণিকার কুরী লেখচিত্র।

প্রভাব ধরে নিয়েও $p = 0$ ভরবেগ সম্পন্ন $\beta^+$ কণিকার সংখ্যা শূন্য হয়। সমীকরণ ( 13·11 ) থেকে আমরা পাই

$$\sqrt{\frac{N(p)}{p^2 F(Z,p)}} = K(E_m - E_\beta) \qquad (13·12)$$

$K$ একটি ধ্রুবক। সমীকরণ (13·12) অনুসারে $\sqrt{N(p)/p^2F(Z,p)}$ এবং $\beta$-শক্তির ($E_\beta$) লেখচিত্র একটি সরলরেখা হওয়া উচিত। এইরূপ লেখচিত্রকে বলা হয় 'কুরী লেখচিত্র' (Kurie-Plot)। $O^{15}$ কেন্দ্রক নিঃসৃত $\beta^+$ কণিকার ক্ষেত্রে পরীক্ষার দ্বারা প্রাপ্ত কুরী লেখচিত্র ( 13·11) চিত্রে প্রদর্শিত হয়েছে। চিত্র থেকে দেখা যায় যে এটি একটি সরলরেখা। লেখচিত্রটি শক্তি অক্ষকে যে বিন্দুতে ছেদ করে সেই বিন্দুর ভুজের (Abscissa) মান থেকে উচ্চতম $\beta$-শক্তি $E_m$ পাওয়া যায়। ফের্মি তত্ত্ব থেকে $\beta$-বিঘটনশীল কেন্দ্রকের অর্ধজীবনকাল (Half Life) এবং উচ্চতম $\beta$-শক্তির মধ্যে একটা গাণিতিক সম্পর্ক পাওয়া যায়। সাধারণতঃ দেখা যায় যে $E_m$ বৃদ্ধি পেলে অর্ধজীবনকাল ($\tau$) হ্রাস পায়। (13·1) সারণীতে অনুমোদিত $\beta$-বিঘটনের ক্ষেত্রে কয়েকটি কেন্দ্রকের অর্ধজীবনকাল এবং উচ্চতম শক্তি লিপিবদ্ধ করা হয়েছে।

**সারণী 13·1**

| নিঃসারক কেন্দ্রক | বিঘটনের প্রকৃতি | অর্ধজীবনকাল | উচ্চতম $\beta$-শক্তি ( মি-ই-ভো ) |
|---|---|---|---|
| নিউট্রন ($_0n^1$) | $\beta^-$ | 12·8 মিনিট | 0·782 |
| $_1H^3$ | $\beta^-$ | 12·4 বৎসর | 0·019 |
| $_8O^{15}$ | $\beta^+$ | 118 সেকেণ্ড | 1·68 |
| $_{29}Cu^{64}$ | $\beta^+,\beta^-$ | 12·8 ঘণ্টা | 0·66 ; 0·57 |

উপরের সারণী থেকে দেখা যায় যে নিউট্রন কণিকাটি স্থায়ী নয়, $\beta$-বিঘটনশীল। বস্তুতঃ নিউট্রন এবং প্রোটনের ভরের পার্থক্যের সংগে এক্ষেত্রে নিঃসৃত উচ্চতম $\beta$-শক্তির সংগতি পাওয়া যায়। নিউট্রন যখন মুক্ত অবস্থায় কেন্দ্রকের বাইরে থাকে, তখনই এর $\beta$-বিঘটন দেখা যায়। কোন কোন কেন্দ্রকের ক্ষেত্রে $\beta^+$ এবং $\beta^-$ উভয় প্রকার বিঘটনই দেখা যায়। উপরের সারণীতে $Cu^{64}$ এইরূপ একটি কেন্দ্রক।

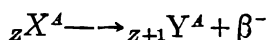
নিউট্রিনোর ভৌত ধর্মাবলী এত অদ্ভুত যে পরীক্ষা দ্বারা এর অস্তিত্বের প্রত্যক্ষ প্রমাণ পাওয়া খুব কঠিন ব্যাপার। নিউট্রিনো আধানহীন হওয়ায় সংঘাতের দ্বারা কোনরূপ আয়ন সৃষ্টি করতে পারে না। আবার এর ভর প্রায় শূন্য হওয়ায় স্থিতিস্থাপক সংঘাত দ্বারা নিউট্রিনো অন্য কোন কণিকাকে

শক্তি প্রদান করতে সমর্থ হয় না। হিসাব করে দেখা যায় যে সূর্য থেকে নিঃসৃত নিউট্রিনোগুলির মধ্যে প্রায় $10^{14}$ সংখ্যক নিউট্রিনো আমাদের শরীরের ভিতর দিয়ে প্রতি সেকেণ্ডে পার হয়ে যায়। কিন্তু এদের এবং আমাদের দেহ মধ্যস্থ পরমাণুগুলির মধ্যে সংঘাতের সম্ভাব্যতা এতই কম যে বছরে একটি সংঘাত হয় কিনা সন্দেহ। এইসব কারণে নিউট্রিনো মতবাদ প্রস্তাবিত হওয়ার এবং $\beta$-বিঘটন তত্ত্বে এর সার্থক প্রয়োগের পরেও প্রায় পঁচিশ বৎসরের মধ্যে নিউট্রিনোর অস্তিত্ব নির্দেশক কোন পরীক্ষা অনুষ্ঠিত করা সম্ভব হয়নি। অবশেষে ১৯৫৬ সালে রাইন্‌স্ এবং কাওয়ান (F. Reins and C.L. Cowan) নামক আমেরিকান বিজ্ঞানীদ্বয় সর্বপ্রথম নিউট্রিনোর অস্তিত্বের পরীক্ষামূলক প্রমাণ দেখাতে সমর্থ হন। এ সম্বন্ধে (17.20) অনুচ্ছেদে বিশদভাবে আলোচনা করা হবে। এখানে উল্লেখযোগ্য যে ইলেকট্রন এবং পজিট্রন উভয় প্রকার কণিকার নিঃসরণকালেই পাউলি কল্পিত নিউট্রিনো নামক কণিকাটি নিঃসৃত হয়। কিন্তু তাত্ত্বিক বিচারে এই দুই ক্ষেত্রে নিঃসৃত নিউট্রিনোর মধ্যে একটা মৌলিক পার্থক্য থাকা উচিত। এদের একটিকে বলা হয় নিউট্রিনো, অন্যটির নাম বিপরীত-নিউট্রিনো (Anti Neutrino)। $\beta^+$ নিঃসরণকালে নিউট্রিনো নিঃসৃত হয়, আর $\beta^-$ নিঃসরণ-কালে বিপরীত-নিউট্রিনো নিঃসৃত হয়। দুই প্রকার নিউট্রিনোর মধ্যে প্রভেদ হচ্ছে যে নিউট্রিনোর ঘূর্ণন কৌণিক ভরবেগ ভেকটর এর বেগের অভিমুখে বিন্যস্ত থাকে; বিপরীত-নিউট্রিনোর ঘূর্ণন কৌণিক ভরবেগ ভেকটর এর বেগের বিপরীতমুখী হয়। পজিট্রন যেমন ইলেকট্রনের বিপরীত কণিকা, বিপরীত-নিউট্রিনোকে সেইরূপ নিউট্রিনোর বিপরীত কণিকারূপে কল্পনা করা হয়।

## 13.7 : $\beta$-বিঘটন শক্তি

কোন কেন্দ্রক স্থায়ী (Stable) না হয়ে $\beta$-বিঘটনশীল হবে কী না তা নির্ভর করে $(Z/N)$ অর্থাৎ কেন্দ্রকের নিউট্রন এবং প্রোটন সংখ্যার অনুপাতের উপর। এ সম্বন্ধে পরে (16.12) অনুচ্ছেদে বিশদভাবে আলোচনা করা হবে। যদি $M(A,Z)$ পরমাণবিক ভর সম্পন্ন X পরমাণু $\beta^-$ কণিকা নিঃসরণের ফলে $M\,(A, Z+1)$ পরমাণবিক ভর সম্পন্ন Y পরমাণুতে রূপান্তরিত হয়, তাহলে $\beta$-বিঘটন শক্তি $Q_\beta$ এবং পরমাণু দুটির ভরের মধ্যে একটা গাণিতিক সম্পর্ক নির্ণয় করা যায়।

উপরোক্ত $\beta$-রূপান্তর নিম্নলিখিত সমীকরণ দ্বারা নির্দেশ করা যায় ঃ

$$_{Z}X^{A} \longrightarrow {}_{Z+1}Y^{A} + \beta^{-}$$

এখানে উল্লেখযোগ্য যে $\beta$-বিঘটনের ফলে পরমাণু কেন্দ্রকের রূপান্তর হয়। সুতরাং $\beta$-বিঘটন শক্তি নির্ণয়কালে X এবং Y কেন্দ্রক দুটির ভর, $M_n(A,Z)$ এবং $M_n(A,Z+1)$ বিবেচনা করার প্রয়োজন। আইনষ্টাইনের ভর-শক্তি সমতা (Mass Energy Equivalence) সূত্র অনুযায়ী কেন্দ্রক দুটির ভরের ব্যবধান থেকে নিঃসৃত ইলেকট্রনের ভর ($m_e$) বিয়োগ করলে $\beta$- বিঘটন শক্তি ($Q_{\beta^-}$) পাওয়া যায় ঃ

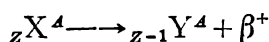
$$Q_{\beta^-} = \{M_n(A,Z) - M_n(A, Z+1) - m_e\}c^2$$

কেন্দ্রকের ভরের পরিবর্তে পরমাণুর ভর ব্যবহার করে উপরের সমীকরণটিকে লেখা যায়

$$Q_{\beta^-} = \{M(A,Z) - Zm_e - M(A,Z+1) + (Z+1)m_e - m_e\}c^2$$

অতএব $\quad Q_{\beta^-} = \{M(A,Z) - M(A,Z+1)\}c^2 \qquad (13\cdot13)$

অনুরূপে পজিট্রন নিঃসরণের ক্ষেত্রে $\beta$-রূপান্তর সমীকরণ হয়

$$_{Z}X^{A} \longrightarrow {}_{Z-1}Y^{A} + \beta^{+}$$

সুতরাং $\quad Q_{\beta^+} = \{M_n(A,Z) - M_n(A, Z-1) - m_e\}c^2$

অথবা $\quad Q_{\beta^+} = \{M(A,Z) - Zm_e - M(A,Z-1) + (Z-1)m_e - m_e\}c^2$

অতএব আমরা পাই

$$Q_{\beta^+} = \{M(A,Z) - M(A, Z-1) - 2m_e\}c^2 \qquad (13\cdot14)$$

এখানে উল্লেখযোগ্য যে ভর বর্ণালীমাপক যন্ত্রের সাহায্যে পরমাণুর মোট ভর ( কেন্দ্রক এবং কক্ষীয় ইলেকট্রনগুলির মিলিত ভর ) পাওয়া যায়। সেইজন্য $\beta$-বিঘটন শক্তি প্রতিপন্ন করার জন্য (13·13) এবং (13·14) সমীকরণদ্বয় ব্যবহার করাই সুবিধাজনক।

সমীকরণ (13·13) থেকে দেখা যায় যে $M(A,Z)$ যদি $M(A,Z+1)$ অপেক্ষা বেশী হয়, তাহলেই X পরমাণুটি $\beta^-$ কণিকা নিঃসৃত করে Y পরমাণুতে রূপান্তরিত হতে পারে। অপরপক্ষে সমীকরণ (13·14) অনুযায়ী আদি ও অবশিষ্ট পরমাণুদ্বয়ের ভর পার্থক্য যদি দুটি ইলেকট্রনের মিলিত ভর অপেক্ষা

বেশী হয়, তবেই X পরমাণুটি $\beta^+$ কণিকা নিঃসৃত করে Y পরমাণুতে রূপান্তরিত হতে পারে। যেহেতু একটি ইলেকট্রনের ভরশক্তি প্রায় 0·51 মি-ই-ভো হয়, অতএব $\beta^+$ নিঃসরণের জন্য জন্য আদি ও অবশিষ্ট পরমাণুদ্বয়ের ভরশক্তির পার্থক্য 1·02 মি-ই-ভো অপেক্ষা বেশী হওয়া প্রয়োজন।

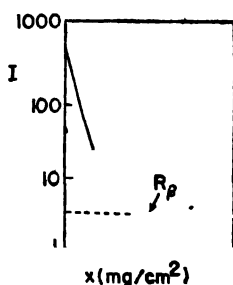
এখানে উল্লেখযোগ্য যে আদি পরমাণুর ভর অবশিষ্ট পরমাণুর ভর অপেক্ষা বেশী হলেই কক্ষীয় ইলেকট্রন আহরণ সম্ভব হয়।

## 13·8 : $\beta$ কণিকার শোষণ

(12·7) অনুচ্ছেদে দেখা গেছে যে তেজস্ক্রিয় পদার্থ নিঃসৃত নির্দিষ্ট শক্তি সম্পন্ন $\alpha$-কণিকার সুনির্দিষ্ট পথসীমা (Range) থাকে। অর্থাৎ উৎস থেকে নিঃসৃত হবার পর $\alpha$-কণিকাগুলি একটা নির্দিষ্ট দূরত্ব পর্যন্ত ভ্রমণ করতে পারে। তারপর সেগুলি সম্পূর্ণ শক্তিহীন হয়ে পড়ে এবং পদার্থের অভ্যন্তরে শোষিত হয়ে যায়।

$\beta$-কণিকাগুলিও পদার্থের অভ্যন্তরে শক্তিক্ষয় করতে থাকে। খুব হালকা হওয়ার জন্য পরমাণবিক ইলেকট্রনের সংগে সংঘাতের ফলে $\beta$-কণিকাগুলি খুব সহজেই বিক্ষিপ্ত (Scattered) হয়ে যায়। তাছাড়া প্রতি সংঘাতে এরা অনেকখানি করে শক্তি হারায়। সেজন্য একই প্রাথমিক শক্তি সম্পন্ন বিভিন্ন $\beta$-কণিকার ভ্রমণপথের মধ্যে এইরূপ সংঘাতের সংখ্যার যথেষ্ট পার্থক্য থাকে। অর্থাৎ $\beta$-কণিকার ক্ষেত্রে পথসীমার মানচ্যুতি (Straggling of the Range) $\alpha$-কণিকার তুলনায় অনেক বেশী হয়। উপরোক্ত দুটি কারণে এবং আদি শক্তির সমতার অভাবে $\beta$-কণিকার পথসীমা $\alpha$-কণিকার মত সুনির্দিষ্ট হয় না।

তথাপি নির্দিষ্ট উচ্চতম শক্তি সম্পন্ন $\beta$-কণিকাগুলির মোটামুটিভাবে একটা নির্দিষ্ট পথসীমা পাওয়া যায়। তেজস্ক্রিয় পদার্থ থেকে $\beta$-কণিকাগুলি বিভিন্ন শক্তি সহকারে নিঃসৃত হয়। যদি বিভিন্ন বেধ সম্পন্ন কোন শোষক (Absorber) ভেদ করে নির্গত $\beta$ কণিকার সংখ্যা গণনা করা হয়, তাহলে শোষক পদার্থের বেধ বৃদ্ধির সংগে উক্ত সংখ্যা প্রায় সূচক (Exponential) সূত্রানুযায়ী হ্রাস পায়। শোষক পদার্থের উপরে আপতিত $\beta$-কণিকার প্রাথমিক শক্তির সমতার অভাব এবং শোষক পদার্থের মধ্যে তাদের বিক্ষেপ, প্রধানতঃ এই দুই কারণেই উপরোক্ত প্রকার পরিবর্তন ঘটে। বেধ বৃদ্ধির সংগে শোষক থেকে নির্গত $\beta$-কণিকার সংখ্যা হ্রাস পেতে থাকে এবং অবশেষে বেধের একটা

মোটামুটি ভাবে নির্দিষ্ট মানের পর আর কোন $\beta$-কণিকা শোষক পদার্থ ভেদ করে নির্গত হতে পারে না। শোষক পদার্থের বেধের এই নির্দিষ্ট মানকে আপতিত উচ্চতম শক্তি সম্পন্ন $\beta$-কণিকার পথসীমা বলে ধরা যেতে পারে ( 13·12 চিত্র দ্রষ্টব্য )।

চিত্র 13·12

$\beta$-কণিকার পথসীমা। কোটি অভিমুখে তীব্রতা $I$ লগারিদমের স্কেলে দেখান হয়েছে।

দৈর্ঘ্যের এককের পরিবর্তে অনেক সময় প্রতি একক ক্ষেত্রফলে বর্তমান পদার্থের ভরের পরিমাণ দ্বারা শোষকের বেধ নির্দেশ করা হয়। $\rho$ ঘনত্ব সম্পন্ন কোন শোষকের বেধ যদি হয় $x$, তাহলে উক্ত শোষকের প্রতি একক ক্ষেত্রফলের ভর $m=\rho x$ হয়। এক্ষেত্রে বেধের একক গ্রাম/সেমি$^2$ বা মিলিগ্রাম/সেমি$^2$ লেখা হয়। স্পষ্টতঃ $\beta$-কণিকার পথসীমাও উপরোক্ত এককে পরিমাপ করা যায়। নির্দিষ্ট উচ্চতম শক্তি সম্পন্ন $\beta$-কণিকার ক্ষেত্রে বিভিন্ন পদার্থের মধ্যে এই এককে পরিমিত পথসীমার মান প্রায় সমান পাওয়া যায়। অর্থাৎ এই এককে নির্দেশিত হলে অ্যালুমিনিয়ামের বা সীসার মধ্যে নির্দিষ্ট উচ্চতম প্রাথমিক শক্তি সম্পন্ন $\beta$-কণিকার পথসীমার বিশেষ পার্থক্য থাকে না।

$\beta$-শক্তি $E>0{\cdot}8$ মি-ই-ভো হলে $\beta$-পথসীমা $R$ শক্তির সংগে প্রায় একঘাতে বৃদ্ধি পায়। বৃটিশ বিজ্ঞানী ফেদার (N. Feather) সর্বপ্রথম পরীক্ষার ভিত্তিতে $R$ এবং $E$ এর মধ্যে একটি সম্পর্ক নিরূপণ করেন। পরে গ্লেন্‌ডেনিন ও করিয়েল (Glendenin and Coryell) সঠিকতর পরিমাপের ভিত্তিতে নিম্নলিখিত সম্পর্কটি পান ঃ

$$R=0{\cdot}542E-0{\cdot}133$$

এখানে $R$ এর একক হচ্ছে গ্রাম/সেমি² এবং $E$ এর একক হচ্ছে মি-ই-ভো।

$E < 0{\cdot}8$ মি-ই-ভো হলে $R$ এবং $E$ এর মধ্যে নিম্নলিখিত সম্পর্কটি পাওয়া যায়ঃ

$$R = 0{\cdot}407\ E^{1{\cdot}38}$$

সাধারণতঃ একই শক্তি সম্পন্ন $\alpha$-কণিকার তুলনায় $\beta$-কণিকার পথসীমা একশত গুণ বা আরও বেশী হয়। $\alpha$-কণিকার তুলনায় আয়নন ক্ষমতা অনেক কম হওয়ায় $\beta$-কণিকাগুলির পথসীমা এত দীর্ঘ হয়। বস্তুতঃ $\beta$-কণিকার আয়নন ক্ষমতা সমশক্তি সম্পন্ন $\alpha$-কণিকার আয়নন ক্ষমতার দুইশত ভাগ মাত্র হয়। $\beta$-কণিকাগুলির বেগের একটা সংকট মান থাকে যার থেকে নিম্নতর বেগে এরা আয়নন উৎপন্ন করতে পারে না। এই সংকট বেগ অপেক্ষা উচ্চতর বেগে এদের আয়নন ক্ষমতা একটা উচ্চতম মান পর্যন্ত দ্রুত বৃদ্ধি পায়। আরও উচ্চতর শক্তিতে এদের আয়নন ক্ষমতা হ্রাস পেতে থাকে এবং অবশেষে ধ্রুবক হয়ে যায়। প্রায় 1000 ই-ভো শক্তি সম্পন্ন $\beta$-কণিকার আয়নন ক্ষমতা উচ্চতম হয়। এই অবস্থায় প্রমাণ উষ্ণতা এবং চাপ সম্পন্ন বায়ুতে এরা প্রায় 100 আয়ন/মিমি উৎপন্ন করে। কিন্তু খুব উচ্চশক্তি সম্পন্ন $\beta$-কণিকাসমূহ একই অবস্থায় বায়ুতে মাত্র 5 আয়ন/মিমি উৎপন্ন করতে পারে।

## 13·9 : কক্ষীয় ইলেকট্রন আহরণ

(13·7) অনুচ্ছেদে আমরা দেখেছি যে $Z$ পরমাণবিক সংখ্যা সম্পন্ন কোন কেন্দ্রক যদি একটি কক্ষীয় ইলেকট্রন আহরণ করে তাহলে সেটি $(Z-1)$ পরমাণবিক সংখ্যা সম্পন্ন কেন্দ্রকে রূপান্তরিত হয়ে যায়। এক্ষেত্রে ইলেকট্রন আহরণের সংগে সংগে একটি নিউট্রিনোও কেন্দ্রক থেকে নিঃসৃত হয়।

যদি আদি কেন্দ্রকটি K কক্ষপথ থেকে ইলেকট্রন আহরণ করে, তাহলে উক্ত কক্ষপথে একটি ইলেকট্রনের স্থান রিক্ত হয়ে যায়। তখন বহিঃস্থ L, M ইত্যাদি যে কোন কক্ষপথ থেকে একটি ইলেকট্রন সংক্রমিত হয়ে উক্ত শূন্যস্থান পূর্ণ করে। এর ফলে একটি বৈশিষ্ট্যপূর্ণ (Characteristic) X-রশ্মি ফোটন নিঃসৃত হয় ( 6·7 অনুচ্ছেদ দ্রষ্টব্য )। বস্তুতঃ এই বৈশিষ্ট্যপূর্ণ X-রশ্মি ফোটনের নিঃসরণই কক্ষীয় ইলেকট্রন আহরণের নির্দেশ পাবার একমাত্র উপায়। কারণ এই সংগে নিঃসৃত নিউট্রিনোটির নিঃসরণ কোন সহজ পদ্ধতিতে নির্দেশ করা সম্ভব নয়।

# পরিচ্ছেদ 14

# গামা-রশ্মি

## 14.1 : $\gamma$ রশ্মির স্বরূপ

$\alpha$ বা $\beta$ বিঘটনের পরে অবশিষ্ট কেন্দ্রক অনেক সময় উত্তেজিত অবস্থায় সৃষ্ট হতে পারে। এই উত্তেজিত কেন্দ্রক সাধারণতঃ $10^{-13}$ সেকেণ্ডের মধ্যে নিম্নতর শক্তিস্তরে সংক্রমিত হয়ে তড়িৎচুম্বকীয় বিকিরণ (Electromagnetic Radiation) নিঃসৃত করে। কেন্দ্রক থেকে নিঃসৃত এইরূপ তড়িৎচুম্বকীয় বিকিরণকে বলা হয় $\gamma$-রশ্মি। (11·2) অনুচ্ছেদে দেখা গেছে যে $\gamma$-রশ্মির ভেদ্যতা $\alpha$ বা $\beta$ রশ্মির তুলনায় অনেক বেশী হয়। তাছাড়া এই রশ্মি তড়িৎক্ষেত্র বা চৌম্বক ক্ষেত্র দ্বারা বিচ্যুত হয় না। প্রাথমিক যুগের বিজ্ঞানীগণ প্রধানতঃ এই দুটি ধর্মের ভিত্তিতেই $\gamma$-রশ্মিকে $\alpha$ বা $\beta$ রশ্মি থেকে পৃথক বলে বুঝতে পারেন।

$\gamma$-রশ্মি নিঃসরণের সংগে উত্তেজিত পরমাণু থেকে তড়িৎচুম্বকীয় বিকিরণ নিঃসরণের সাদৃশ্য আছে। শেষোক্ত ক্ষেত্রে অবশ্য বিকিরণ নিঃসৃত হয় পরমাণুর কক্ষীয় ইলেকট্রনের এক শক্তিস্তর থেকে অন্য স্তরে সংক্রমণের ফলে। এই নিঃসৃত বিকিরণ দৃশ্যমান, অতিবেগনী (Ultra Violet) বা অবলোহিত (Infra Red) অঞ্চলে অবস্থিত হয়। বিভিন্ন পরমাণুর মধ্যে সংযোজী ইলেকট্রনের শক্তি সাধারণতঃ মাত্র কয়েক ইলেকট্রন-ভোল্ট মাত্রা সম্পন্ন হয়। সুতরাং পরমাণু নিঃসৃত আলোক ফোটনের শক্তি $h\nu$ কয়েক ই-ভো অথবা অনেক সময় এক ইলেকট্রন-ভোল্টের অংশ মাত্র হয়। অপরপক্ষে তেজস্ক্রিয় পদার্থ নিঃসৃত $\alpha$ বা $\beta$ কণিকার শক্তির পরিমাপ থেকে বোঝা যায় যে কেন্দ্রকের শক্তিস্তরগুলির শক্তি মিলিয়ন $(10^6)$ ই-ভো মাত্রা সম্পন্ন হয়। এইসব শক্তিস্তরের মধ্যে সংক্রমণের ফলে নিঃসৃত $\gamma$-ফোটনের শক্তিও সেইজন্য ন্যূনতম কয়েক সহস্র ই-ভো থেকে কয়েক মিলিয়ন ই-ভো পর্যন্ত বিস্তৃত হয়। (6·7) অনুচ্ছেদে দেখা গেছে যে পরমাণুর অভ্যন্তরস্থ কক্ষপথে আবর্তনশীল ইলেকট্রনের সংক্রমণের ফলে উদ্ভূত বৈশিষ্ট্যপূর্ণ X-রশ্মি ফোটনের শক্তি কয়েক সহস্র ই-ভো পর্যন্ত হয়। স্পষ্টতঃ $\gamma$-ফোটনের শক্তি এইসব X-রশ্মি ফোটনের শক্তি অপেক্ষাও অনেক বেশী হয়। X-রশ্মির তরঙ্গদৈর্ঘ্য কয়েক অ্যাংষ্ট্রম বা অনেক ক্ষেত্রে এক অ্যাংষ্ট্রম অপেক্ষাও কম হয়। $\gamma$-রশ্মির তরঙ্গদৈর্ঘ্য আরও অনেক কম

হয়। উদাহরণস্বরূপ $10^4$, $10^5$ এবং $10^6$ ই-ভো শক্তি সম্পন্ন $\gamma$-রশ্মির তরঙ্গদৈর্ঘ্য হয় যথাক্রমে 1·24, 0·124 এবং 0·0124 অ্যাংষ্ট্রম। প্রাকৃতিক তেজস্ক্রিয় মৌলসমূহের মধ্যে ক্ষুদ্রতম তরঙ্গদৈর্ঘ্য সম্পন্ন $\gamma$-রশ্মি নিঃসৃত হয় ThC″ থেকে। এক্ষেত্রে $\gamma$-রশ্মির তরঙ্গদৈর্ঘ্য পাওয়া যায় 0·0047 অ্যাং। তরঙ্গদৈর্ঘ্য এবং ফোটনের শক্তির মধ্যেকার সম্পর্ক থেকে এই ফোটনের শক্তি নিরূপণ করলে পাওয়া যায় $E_\gamma = 2{\cdot}62$ মি-ই-ভো। কৃত্রিম উপায়ে কেন্দ্রক রূপান্তর কালে নিঃসৃত $\gamma$-ফোটনের শক্তি অনেক সময় আট-দশ মি-ই-ভো অথবা আরও বেশী হয়। এইসব ক্ষেত্রে $\gamma$-রশ্মির তরঙ্গদৈর্ঘ্য এক অ্যাংষ্ট্রমের সহস্র ভাগ বা আরও কম হয়।

### 14.2 : $\gamma$ রশ্মির তরঙ্গদৈর্ঘ্য নিরূপণ

যে সব ক্ষেত্রে $\gamma$-রশ্মির তরঙ্গদৈর্ঘ্য X-রশ্মির তরঙ্গদৈর্ঘ্যের সংগে তুলনীয় হয়, সেই সব ক্ষেত্রে কেলাস-ব্যবর্তন (Crystal Diffraction) পদ্ধতিতে $\gamma$-রশ্মির তরঙ্গদৈর্ঘ্য নিরূপণ করা যায়। (6·16) অনুচ্ছেদে বর্ণিত আবর্তন-আলোকচিত্র (Rotation Photograph) পদ্ধতি অবলম্বন করে ন্যূনতম তরঙ্গদৈর্ঘ্য পরিমাপ করা হয়েছে RaC′ কেন্দ্রক থেকে নিঃসৃত অন্যতম $\gamma$-বর্ণালী রেখার ক্ষেত্রে। এই তরঙ্গদৈর্ঘ্য হচ্ছে $\lambda = 0{\cdot}016$ অ্যাং।

ডুমণ্ড এবং কোশোয়া (Dumond and Cauchois) উদ্ভাবিত বক্র কেলাস বর্ণালীমাপক যন্ত্রের (Curved Crystal Spectrometer) সাহায্যে 0·01 অ্যাংষ্ট্রম অপেক্ষাও ক্ষুদ্রতর তরঙ্গদৈর্ঘ্য খুব সঠিক ভাবে পরিমাপ করা যায় ( 6·13 অনুচ্ছেদ দ্রষ্টব্য )।

যদি নিঃসৃত $\gamma$-ফোটনের শক্তি হয় $E_\gamma$, তাহলে আমরা লিখতে পারি

$$E_\gamma = h\nu = hc/\lambda$$

তরঙ্গদৈর্ঘ্য $\lambda$ পরিমাপ করে নিঃসৃত $\gamma$-ফোটনের শক্তি $E_\gamma$ নির্ণয় করা যায়। পদার্থের মধ্য দিয়ে পরিভ্রমণ কালে $\gamma$-রশ্মি পদার্থের সংগে নানাভাবে বিক্রিয়া (Interact) করে ইলেকট্রন নিঃসৃত করে। চৌম্বক বর্ণালীমাপক যন্ত্রের সাহায্যে বা অন্য কোন যথোপযুক্ত ব্যবস্থা অবলম্বন করে এইসব নিঃসৃত ইলেকট্রনের শক্তি পরিমাপ করা যায়, এবং তার থেকে $\gamma$ ফোটনের শক্তি ($E_\gamma$) এবং তরঙ্গদৈর্ঘ্য ($\lambda$) নিরূপণ করা যায়।

$\gamma$-রশ্মি সাধারণতঃ পদার্থের সংগে তিনভাবে বিক্রিয়া করে : (ক) ফোটো

ইলেকট্রন নিঃসরণ, (খ) কম্পটন বিক্ষেপ এবং (গ) ইলেকট্রন পজিট্রন যুগল কণিকা উৎপাদন (Pair Creation)। প্রাকৃতিক তেজস্ক্রিয় পদার্থ নিঃসৃত $\gamma$-রশ্মির ক্ষেত্রে প্রথম দুটি প্রক্রিয়াই গুরুত্বপূর্ণ। তৃতীয় প্রক্রিয়াটি এক মি-ই-ভো অপেক্ষা যথেষ্ট উচ্চতর শক্তি সম্পন্ন $\gamma$-রশ্মির ক্ষেত্রে গুরুত্বপূর্ণ হয়।

## 14·3 : $\gamma$-রশ্মির অলোক-তাড়িত শোষণ

পরমাণুর মধ্যে কক্ষীয় ইলেকট্রনের বন্ধন শক্তি ($W$) অপেক্ষা উচ্চতর শক্তি সম্পন্ন আলোক ফোটন যদি কোন পরমাণুর উপর আপতিত হয়, তাহলে ফোটনটির সমগ্র শক্তি $h\nu$ কক্ষীয় ইলেকট্রনটি শোষণ করে পরমাণু থেকে নিঃসৃত হতে পারে। নিঃসৃত ইলেকট্রনের গতিশক্তি হয়

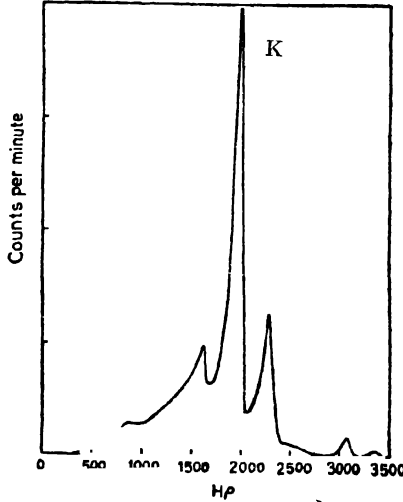
$$E = h\nu - W$$

যেহেতু $\gamma$-রশ্মির শক্তি $h\nu$ সাধারণতঃ যথেষ্ট উচ্চ হয়, এই রশ্মির ক্রিয়ায় পরমাণুর আভ্যন্তরীণ কক্ষপথ ( যথা K, L ইত্যাদি ) থেকে ফোটো ইলেকট্রন নিঃসৃত হতে পারে।

নির্দিষ্ট শক্তি সম্পন্ন $\gamma$-রশ্মি কর্তৃক বিশেষ কোন কক্ষপথ থেকে নিঃসৃত ফোটো ইলেকট্রনগুলি সব সমশক্তি সম্পন্ন হয়। যদি K, L প্রভৃতি কক্ষপথে ইলেকট্রনের বন্ধন শক্তি হয় $W_K, W_L$ ইত্যাদি, তাহলে স্পষ্টতঃ

$$h\nu = E_K + W_K = E_L + W_L = \cdots \tag{14·1}$$

এখানে $E_K$, $E_L$ প্রভৃতি বিভিন্ন কক্ষপথ থেকে নিঃসৃত ফোটো ইলেকট্রনের গতিশক্তি নির্দেশ করে। $\gamma$-রশ্মি দ্বারা এই ভাবে নিঃসৃত ফোটো ইলেকট্রনগুলির গতিশক্তি (13·3) অনুচ্ছেদে বর্ণিত চৌম্বক বর্ণালীমাপক (Magnetic Spectrometer) যন্ত্রের সাহায্যে পরিমাপ করা যায়। তেজস্ক্রিয় পদার্থের নিকটে অবস্থিত একটি নির্দিষ্ট ধাতু নির্মিত পাতের উপরে $\gamma$-রশ্মিগুচ্ছ আপতিত হয়ে ফোটো ইলেকট্রন নিঃসৃত করে। চৌম্বক বর্ণালীমাপক যন্ত্রের মধ্যে এই ইলেকট্রনগুলিকে একটি গাইগার-মূলার সংখ্যায়কের (Counter) উপরে ফোকাসিত করা হয়। নির্দিষ্ট প্রাথমিক শক্তি সম্পন্ন $\gamma$-রশ্মি দ্বারা বিভিন্ন কক্ষপথ থেকে নিঃসৃত ফোটো ইলেকট্রনগুলি চৌম্বক ক্ষেত্রের বিভিন্ন নির্দিষ্ট মানে গাইগার-মূলার সংখ্যায়কের উপরে ফোকাসিত হয়ে কয়েকটি বিভিন্ন চূড়া (Peaks) উৎপন্ন করে। (14·1) চিত্রে এইরূপ চূড়ার নিদর্শন দেখান হয়েছে। চূড়াগুলির অবস্থান থেকে বিভিন্ন কক্ষ পথ থেকে নিসৃত ফোটো ইলেকট্রনসমূহের গতিশক্তি পরিমাপ করা যায়।

এর থেকে (14·1) সমীকরণের সাহায্যে $\gamma$-রশ্মির শক্তি নিরূপণ করা যায়। বিভিন্ন কক্ষপথ থেকে নিঃসৃত ফোটো ইলেকট্রনের শক্তি স্বতন্ত্র ভাবে নির্ণয় করে $\gamma$-শক্তি ($h\nu$) খুব নির্ভুল ভাবে নির্ণয় করা সম্ভব।

চিত্র 14·1

চৌম্বক বর্ণালীমাপক যন্ত্রের সাহায্যে প্রাপ্ত $\gamma$-রশ্মির দ্বারা নিঃসৃত ফোটো ইলেকট্রন চূড়ার নিদর্শন।

এখানে উল্লেখযোগ্য যে L, M প্রভৃতি পরমাণু কক্ষপথগুলির মধ্যে একাধিক উপকক্ষপথ থাকে ; যথা $L_I$, $L_{II}$, $L_{III}$, $M_I$, $M_{II}$,···ইত্যাদি। সেইজন্য এই সব কক্ষপথ থেকে নিঃসৃত ফোটো ইলেকট্রনের ক্ষেত্রে একাধিক চূড়া উৎপন্ন হয়। এদের প্রত্যেকটি থেকে পৃথক পৃথক ভাবে $\gamma$-শক্তি নিরূপণ করা যায়।

যদি $I$ প্রাথমিক তীব্রতা (Intensity) সম্পন্ন $\gamma$-রশ্মিগুচ্ছ একটি $\Delta x$ বেধ সম্পন্ন শোষক পাতের উপর আপতিত হয়, তাহলে পাতের ভিতরে আলোক-তাড়িত ক্রিয়ার ফলে অপরদিকে নির্গত $\gamma$-রশ্মির তীব্রতা হ্রাস পায়। এই হ্রাসের পরিমাণ যদি $\Delta I$ হয়, তাহলে আমরা লিখতে পারি ( 6·10 অনুচ্ছেদ দ্রষ্টব্য )

$$\Delta I = -\mu_{ph} I \Delta x = -\sigma_{ph} n I \Delta x \tag{14·2}$$

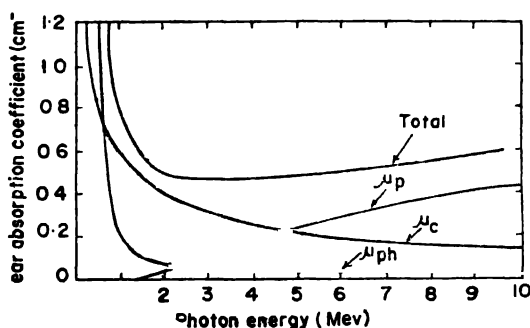
এখানে $\mu_{ph}$ হচ্ছে 'রৈখিক আলোক-তাড়িত .শোষণ গুণাংক' (Linear Photo Electric Absorption Coefficient)। $n$ হচ্ছে শোষকের একক আয়তনে বর্তমান পরমাণুর সংখ্যা। $\sigma_{ph}$ সংখ্যাটিকে বলা হয় 'পরমাণবিক আলোক-তাড়িত শোষণ গুণাংক' (Atomic Photo Electric Absorption Coefficient)। স্পষ্টতঃ $n\Delta x$ হচ্ছে শোষকের একক ক্ষেত্রফলে বর্তমান পরমাণুর সংখ্যা। যদি $n\Delta x = 1$ হয়, তাহলে ফোটো-ইলেকট্রন নিঃসরণের সম্ভাব্যতা হয়

$$\Delta I/I = -\sigma_{ph} \tag{14·3}$$

অর্থাৎ $\sigma_{ph}$ একক ক্ষেত্রফলে বর্তমান একটি মাত্র পরমাণু থেকে ফোটো-ইলেকট্রন নিঃসরণের সম্ভাব্যতা নির্দেশ করে। স্পষ্টতঃ

$$\sigma_{ph} = \mu_{ph}/n \tag{14·4}$$

যেহেতু $\mu_{ph}$ সংখ্যাটি দৈর্ঘ্যের বিপরীত মাত্রা (Dimension) সম্পন্ন হয় এবং $n$ সংখ্যাটির মাত্রা $[L^{-3}]$ হয়, সুতরাং $\sigma_{ph}$ এর মাত্রা $[L^{2}]$ হয়। অর্থাৎ $\sigma_{ph}$ সংখ্যাটি ক্ষেত্রফলের মাত্রা সম্পন্ন হয়। সেইজন্য এই সংখ্যাটিকে সাধারণতঃ বলা হয় 'আলোক-তাড়িত শোষণ প্রস্থচ্ছেদ' (Photo Electric Absorption Cross Section)।

কোয়ানটাম বলবিদ্যা তত্ত্বের সাহায্যে $\sigma_{ph}$ এর মান প্রতিপন্ন করা যায়। $\sigma_{ph}$ সাধারণতঃ শোষকের পরমাণবিক সংখ্যার ($Z$) উপর নির্ভর করে ঃ

চিত্র 14·2

সীসার মধ্যে γ-শক্তির সংগে রৈখিক শোষণ গুণাংক পরিবর্তনের লেখচিত্র।

$\sigma_{ph} \propto Z^5$ হয়। অর্থাৎ অ্যালুমিনিয়াম ($Z=13$) প্রভৃতি নিম্ন $Z$ সম্পন্ন শোষক অপেক্ষা সীসা ($Z=82$) প্রভৃতি উচ্চ $Z$ সম্পন্ন শোষক ফোটো ইলেকট্রন নিঃসরণের পক্ষে অনেক বেশী কার্যকরী হয়। আবার আপতিত $\gamma$-রশ্মির তরঙ্গদৈর্ঘ্যের ( অর্থাৎ শক্তির ) উপরে $\sigma_{ph}$ নির্ভর করে। নিম্ন $\gamma$-শক্তির ক্ষেত্রে $\sigma_{ph} \propto \lambda^{\frac{7}{2}}$ পাওয়া যায়। উচ্চশক্তি সম্পন্ন $\gamma$-রশ্মির ক্ষেত্রে ( $E_\gamma > 0{\cdot}5$ মি-ই-ভো ) নিঃসৃত ইলেকট্রনের গতি আপেক্ষিকতাবাদ দ্বারা নির্ধারিত হয়। এক্ষেত্রে $\sigma_{ph} \propto \lambda$ হয়। উভয়ক্ষেত্রেই $\gamma$-রশ্মির তরঙ্গদৈর্ঘ্য হ্রাস পেলে, অর্থাৎ শক্তি বৃদ্ধি পেলে, $\sigma_{ph}$ হ্রাস পায়। (14·2) চিত্রে সীসার মধ্যে $\gamma$-শক্তির পরিবর্তনের সংগে আলোকতাড়িত শোষণ গুণাংক $\mu_{ph}$ পরিবর্তনের লেখচিত্রের নিদর্শন দেখান হয়েছে। স্পষ্টতঃ ফোটো-ইলেকট্রনের সাহায্যে $\gamma$-শক্তি পরিমাপ করার সময় উচ্চ $Z$-সম্পন্ন শোষক ( যেথা সীসা, সোনা, ইত্যাদি ) ব্যবহার করা প্রয়োজন, যাতে যথেষ্ট সংখ্যক ইলেকট্রন নিঃসৃত হয়। নির্দিষ্ট শক্তি সম্পন্ন $\gamma$-রশ্মির ক্ষেত্রে সাধারণতঃ K-কক্ষপথ থেকে ফোটো-ইলেকট্রন নিঃসরণের সম্ভাব্যতা সর্বাপেক্ষা বেশী হয় ( শতকরা 80 ভাগ বা ততোধিক )।

### 14·4 : $\gamma$ রশ্মির কম্পটন বিক্ষেপ

(6·11) অনুচ্ছেদে X-রশ্মির কম্পটন বিক্ষেপ (Compton Scattering) সম্বন্ধে বিশদভাবে আলোচনা করা হয়েছে। $h\nu$ শক্তি সম্পন্ন একটি ফোটন $\theta$ কোণে বিক্ষিপ্ত হলে ফোটনটির তরঙ্গদৈর্ঘ্য বৃদ্ধির পরিমাণ হয় ( সমীকরণ 6·27 দ্রষ্টব্য ):

$$\Delta\lambda = 2\lambda_c \sin^2\theta/2$$

এখানে $\lambda_c = \dfrac{h}{m_0 c}$ হচ্ছে কম্পটন তরঙ্গদৈর্ঘ্য। $h$, $m_0$ এবং $c$ যথাক্রমে প্ল্যাংক-ধ্রুবক, ইলেকট্রনের ভর এবং শূন্যে আলোকের বেগ নির্দেশ করে। যদি $\nu'$ হয় বিক্ষিপ্ত ফোটনের কম্পাংক তাহলে কম্পটন ক্রিয়ার ফলে প্রতিক্ষিপ্ত (Recoil) ইলেকট্রনের গতিশক্তি হয়:

$$E_e = E_\gamma - E'_\gamma = h(\nu - \nu')$$

কম্পটন প্রতিক্ষিপ্ত ইলেকট্রনের শক্তি প্রতিক্ষেপ দিকের উপরে নির্ভর করে। ফোটনের সম্মুখদিকে ($\theta = 0$) বিক্ষেপের সময় ইলেকট্রনটি বিপরীত দিকে প্রতিক্ষিপ্ত হয় এবং এর শক্তি তখন ন্যূনতম অর্থাৎ শূন্য হয়। অন্যান্য

কোণে প্রতিক্ষিপ্ত ইলেকট্রনের শক্তি উচ্চতর হয়। ফোটনের $\theta = \pi$ কোণে বিক্ষেপের সময় ইলেকট্রনটি সম্মুখ দিকে, অর্থাৎ আপতন দিকের অভিমুখে প্রতিক্ষিপ্ত হয়। এক্ষেত্রে বিক্ষিপ্ত ফোটনের তরঙ্গদৈর্ঘ্য পরিবর্তনের মান হয়

$$\Delta\lambda = \lambda' - \lambda = 2\lambda_c$$

সুতরাং বিক্ষিপ্ত ফোটনের শক্তি হয়

$$h\nu' = \frac{hc}{\lambda'} = \frac{hc}{\lambda + 2\lambda_c}$$

অতএব সম্মুখদিকে প্রতিক্ষিপ্ত ইলেকট্রনের গতিশক্তি হয়

$$E_e = \frac{hc}{\lambda} - \frac{hc}{\lambda + 2\lambda_c} = \frac{hc}{\lambda} \cdot \frac{2\lambda_c}{\lambda + 2\lambda_c} \tag{14·5}$$

যেহেতু পশ্চাৎদিকে ( $\theta = \pi$ কোণে ) বিক্ষিপ্ত ফোটনের তরঙ্গদৈর্ঘ্য পরিবর্তন $\Delta\lambda$ সর্বাধিক হয়, সুতরাং এইদিকে বিক্ষিপ্ত ফোটনের শক্তি ন্যূনতম হয়। অতএব সম্মুখ দিকে প্রতিক্ষিপ্ত ইলেকট্রনের শক্তি উচ্চতম হয়।

সমান্তরিত একগুচ্ছ $\gamma$-রশ্মি একটি বিক্ষেপকের উপরে আপতিত হয়ে বিভিন্ন দিকে কম্পটন প্রতিক্ষিপ্ত ইলেকট্রন নিঃসৃত করে। এদের মধ্যে সম্মুখ দিকে প্রতিক্ষিপ্ত ইলেকট্রনগুলিকে বেছে নিয়ে যদি একটি চৌম্বক বর্ণালীলেখ যন্ত্রের সাহায্যে তাদের গতিশক্তি পরিমাপ করা যায়, তাহলে ( 14·5 ) সমীকরণের সাহায্যে আপতিত $\gamma$-রশ্মির তরঙ্গদৈর্ঘ্য নির্ণয় করা যায়। অবশ্য এই পদ্ধতিতে তরঙ্গদৈর্ঘ্যের মান খুব সঠিকভাবে নিরূপণ করা যায় না।

কম্পটন-বিক্ষেপের সম্ভাব্যতার কোয়ানটাম বলবিদ্যা ভিত্তিক তত্ত্ব সর্বপ্রথম উদ্ভাবিত করেন ক্লাইন এবং নিশিনা (Klein and Nishina) নামক বিজ্ঞানীদ্বয়। যদি রৈখিক কম্পটন বিক্ষেপ গুণাংক (Linear Compton Scattering Coefficient) হয় $\mu_c$ এবং পরমাণবিক ইলেকট্রন প্রতি কম্পটন বিক্ষেপ প্রস্থচ্ছেদ হয় $\sigma_e$ ( 6·10 অনুচ্ছেদ দ্রষ্টব্য ), তাহলে আমরা লিখতে পারি

$$\mu_c = \sigma_e \cdot \frac{N\rho}{M} \cdot Z \tag{14·6}$$

( সমীকরণ 6·15 এবং 6·19 দ্রষ্টব্য )। এখানে $N$ এবং $\rho$ হচ্ছে

যথাক্রমে অ্যাভোগেড্রো সংখ্যা এবং বিক্ষেপকের ঘনত্ব। $Z$ এবং $M$ হচ্ছে যথাক্রমে বিক্ষেপকের পরমাণবিক সংখ্যা এবং পরমাণবিক ভার। ($N\rho Z/M$) হচ্ছে বিক্ষেপকের প্রতি একক আয়তনে বর্তমান ইলেকট্রন সংখ্যা।

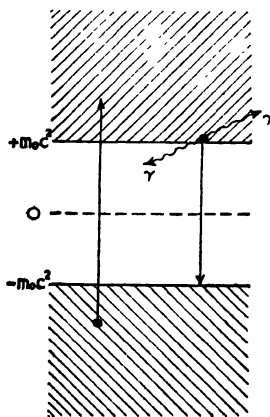
ক্লাইন এবং নিশিনা তাত্ত্বিক ভিত্তিতে $\sigma_e$ সংখ্যাটির মান প্রতিপন্ন করেন। তাঁদের তত্ত্ব অনুযায়ী $\sigma_e$ পরমাণবিক সংখ্যা $Z$ এর উপর নির্ভর করে না। যেহেতু $(Z/M)$ সংখ্যাটি বিভিন্ন মৌলের ক্ষেত্রে অল্পই পরিবর্তিত হয়, সুতরাং সমীকরণ (14·6) অনুযায়ী ভর-বিক্ষেপ গুণাংক (Mass Scattering Coefficient) $\mu_c/\rho$ পরমাণবিক সংখ্যা $Z$ পরিবর্তনের সংগে বিশেষ পরিবর্তিত হয় না। অর্থাৎ বিভিন্ন মৌল থেকে $\gamma$-রশ্মির কম্পটন বিক্ষেপের সম্ভাব্যতা প্রায় সমান হয়। ইলেকট্রন প্রতি কম্পটন বিক্ষেপ প্রস্থচ্ছেদ $\sigma_e$ ফোটনের শক্তি বৃদ্ধির সংগে হ্রাস পায়। নিম্নশক্তি সম্পন্ন ফোটনের ক্ষেত্রে এই হ্রাস অপেক্ষাকৃত ধীরে হয়; যদি $h\nu > 0{\cdot}5$ মি-ই-ভো হয়, তাহলে ক্লাইন-নিশিনা ফর্মুলা অনুযায়ী $\sigma_e \propto 1/h\nu$ পাওয়া যায়। অর্থাৎ ফোটনের শক্তি বৃদ্ধির সংগে কম্পটন বিক্ষেপের সম্ভাব্যতা ফোটো ইলেকট্রন নিঃসরণের সম্ভাব্যতার তুলনায় অনেক মন্থর হারে হ্রাস পায়। (14·2) চিত্রে ফোটনের শক্তির সংগে সীসার মধ্যে কম্পটন বিক্ষেপ গুণাংক ($\mu_c$) পরিবর্তনের লেখচিত্রের নিদর্শন দেখান হয়েছে।

### 14·5 : $\gamma$ রশ্মি কর্তৃক ইলেকট্রন-পজিট্রন যুগল উৎপাদন

পদার্থের সংগে $\gamma$-রশ্মির বিক্রিয়ার তৃতীয় পন্থা হচ্ছে ইলেকট্রন-পজিট্রন যুগল (Pair) কণিকা উৎপাদন। ইতিপূর্বে আমরা দেখেছি যে কৃত্রিম উপায়ে সৃষ্ট তেজস্ক্রিয় কোন কোন পরমাণু থেকে পজিট্রন নিঃসৃত হতে দেখা যায়। এই কণিকাটিকে ইলেকট্রনের 'বিপরীত কণিকা' (Anti Particle) নামে অভিহিত করা হয়।

১৯২৮ সালে প্রখ্যাত বৃটিশ বিজ্ঞানী ডিরাক (P. A. M. Dirac) ইলেকট্রনের একটি নূতন তত্ত্ব উদ্ভাবিত করেন। শ্রোডিংগার (Schrödinger) উদ্ভাবিত কোয়ানটাম বলবিদ্যা তত্ত্বের সাহায্যে হাইড্রোজেন সদৃশ পরমাণু থেকে নিঃসৃত বর্ণালীরেখার সঠিক ব্যাখ্যা করা সম্ভব তা আমরা (7·11) অনুচ্ছেদে দেখেছি। কিন্তু এই তত্ত্বের সাহায্যে হাইড্রোজেন

বর্ণালীর সূক্ষ্ম গঠন (Fine Structure) ব্যাখ্যা করা যায় না। হাইড্রোজেন পরমাণুর মধ্যে ইলেকট্রন যেরূপ উচ্চ বেগ সহকারে বিচরণ করে, তাতে এর গতি সনাতন বলবিদ্যা তত্ত্ব দ্বারা নির্ধারিত হয় না, আপেক্ষিকতাবাদ দ্বারাই নির্ধারিত হয়। শ্রোডিংগার তত্ত্বে কিন্তু ধরে নেওয়া হয় যে, ইলেকট্রনের গতিশক্তি এবং ভরবেগের সম্পর্ক সনাতন বলবিদ্যা তত্ত্ব অনুযায়ী নির্ধারিত হয়। ডিরাক্ সর্বপ্রথম আপেক্ষিকতাবাদ অনুযায়ী প্রাপ্ত ইলেকট্রনের শক্তি ও ভরবেগের মধ্যেকার সম্পর্ক বিবেচনা করে কোয়ানটাম বলবিদ্যা লব্ধ ইলেকট্রনের তরংগ-সমীকরণ (Wave Equation) সমাধান করেন। তাঁর এই তত্ত্ব খুবই জটিল। এই তত্ত্বের ভিত্তিতে তিনি হাইড্রোজেন বর্ণালীর সূক্ষ্ম গঠন ব্যাখ্যা করতে সমর্থ হন। তাঁর তত্ত্বের অন্যতম সিদ্ধান্ত হচ্ছে যে ইলেকট্রনের $\frac{1}{2}(h/2\pi)$ মাত্রা সম্পন্ন ঘূর্ণন কৌণিক ভরবেগ (Spin Angular Momentum) থাকবে। প্রাচীন কোয়ানটাম তত্ত্বে ইলেকট্রনের ঘূর্ণন কৌণিক ভরবেগ কল্পনা করা হয় (5·2 অনুচ্ছেদ দ্রষ্টব্য) সম্পূর্ণ অনুভূতিমূলক (Empirical) ভাবে। ডিরাক তত্ত্বে কিন্তু ইলেকট্রন ঘূর্ণন খুব স্বাভাবিক ভাবেই পাওয়া যায়।

ডিরাক তত্ত্বের আর একটি খুব গুরুত্বপূর্ণ সিদ্ধান্ত হচ্ছে যে ইলেকট্রনের মোট শক্তি (গতিশক্তি + স্থির ভরশক্তি) শুধু যে ধনাত্মক হতে পারে

চিত্র 14·3

ডিরাক তত্ত্ব অনুযায়ী ইলেকট্রনের ধনাত্মক ও ঋণাত্মক শক্তি অবস্থাসমূহ।

তা নয়, ঋণাত্মকও হতে পারে। ডিরাক সমীকরণ সমাধান করলে দেখা যায় যে ইলেকট্রনের মোট শক্তি ($+m_0c^2$) অপেক্ষা বেশী হতে পারে, কিংবা ($-m_0c^2$) অপেক্ষা কম হতে পারে। এখানে $m_0c^2$ হচ্ছে ইলেকট্রনের স্থির শক্তি (Rest Energy)। (14·3) চিত্রে ডিরাক তত্ত্ব অনুযায়ী ইলেকট্রনের সম্ভাব্য শক্তি কীরূপ হতে পারে তা দেখান হয়েছে। স্পষ্টতঃ $+m_0c^2$ থেকে $-m_0c^2$ পর্য্যন্ত বিস্তৃত সীমার মধ্যে ইলেকট্রনের কোন শক্তি থাকতে পারে না।

ইলেকট্রন যখন ধনাত্মক শক্তি সম্পন্ন হয় ($E > m_0c^2$), তখন তার ধর্মাবলী সাধারণ প্রকৃতিলব্ধ ইলেকট্রনের মত হয়। ঋণাত্মক শক্তি অবস্থায় বর্তমান ইলেকট্রনের অস্তিত্ব কিন্তু ভৌত জগতের অগোচরেই থেকে যায়। প্রকৃতিতে সব ভৌত মণ্ডলীরই (Physical Systems) সব সময় উচ্চতর শক্তি থেকে নিম্নতর শক্তি অবস্থায় সংক্রমিত হবার প্রবণতা দেখা যায়। স্পষ্টতঃ ডিরাক কল্পিত ইলেকট্রনের ঋণাত্মক শক্তি যদি সত্য সত্যই সম্ভব হয়, তাহলে সব ধনাত্মক শক্তি সম্পন্ন ইলেকট্রনই ঋণাত্মক শক্তি অবস্থায় সংক্রমিত হতে চাইবে। ফলে ধনাত্মক শক্তি সম্পন্ন ইলেকট্রন, যা সমগ্র বিশ্বজগৎ (Universe) পরিব্যাপ্ত করে থাকে, তার কোন অস্তিত্বই থাকতে পারে না। ডিরাকের মতানুযায়ী এইরূপ অভাবনীয় অবস্থা না ঘটার কারণ হচ্ছে যে, বিশ্বজগতে সমস্ত সম্ভাব্য ঋণাত্মক শক্তি অবস্থা (States) ইলেকট্রন দ্বারা পরিপূর্ণ থাকে। যেহেতু পাউলি অপবর্জন তত্ত্ব (Pauli's Exclusion Principle) অনুযায়ী একই কোয়ানটাম অবস্থায় একাধিক ইলেকট্রন থাকতে পারে না, অতএব ধনাত্মক শক্তি অবস্থা থেকে কোন ইলেকট্রনই সামগ্রিকভাবে ইলেকট্রন-পূর্ণ ঋণাত্মক শক্তি অবস্থায় সংক্রমিত হতে পারে না।

যদি কোন কারণে ঋণাত্মক শক্তি অবস্থা থেকে একটি ইলেকট্রন অপসৃত হয়, তাহলে সেই স্থানে একটি রিক্ততার, অর্থাৎ গহ্বরের (Hole) সৃষ্টি হয়। যেহেতু এই গহ্বর একটি ঋণাত্মক আধান সম্পন্ন ইলেকট্রনের অনুপস্থিতির জন্য সৃষ্ট হয়, সেটি একটি ধনাত্মক আধানবাহী কণিকার ন্যায় আচরণ করবে। তাছাড়া ঋণাত্মক শক্তি অবস্থায় সৃষ্ট গহ্বর ( অর্থাৎ রিক্ততা ) একটি ধনাত্মক শক্তি সম্পন্ন কণিকার ন্যায় আচরণ করবে। সুতরাং ঋণাত্মক শক্তি অবস্থায় সৃষ্ট উক্ত গহ্বরটি সামগ্রিকভাবে একটি ধনাত্মক আধানবাহী ধনাত্মক শক্তি সম্পন্ন কণিকার ন্যায় আচরণ করবে। ডিরাক্ প্রথমে অনুমান করেন যে প্রোটনই হচ্ছে এই নব কল্পিত কণিকা। কিন্তু

এই অনুমান অযৌক্তিক। কারণ প্রোটনের ভর ইলেকট্রনের তুলনায় অনেক বেশী হয়।

১৯৩৩ সালে অ্যান্ডারসন (C. D. Anderson) মেঘ-কক্ষ (Cloud Chamber) যন্ত্রের সাহায্যে মহাজাগতিক রশ্মির (Cosmic Ray) মধ্যে একটি নূতন কণিকার সন্ধান পান, যার ভর ইলেকট্রনের ভরের সমান, কিন্তু যা ইলেকট্রনীয় আধানের সমপরিমাণ ধনাত্মক আধান বহন করে। অ্যান্ডারসনের পরীক্ষা সম্বন্ধে (20·6) অনুচ্ছেদে বিশদভাবে আলোচনা করা হবে। তাঁর এই আবিষ্কারের পর প্রতীয়মান হয় যে, এই নব আবিষ্কৃত কণিকাটিই হচ্ছে ডিরাক্ কল্পিত ইলেকট্রনের বিপরীত কণিকা (Anti Particle)। এর নাম দেওয়া হয় পজ়িট্রন (Positron)। পজ়িট্রনের আবিষ্কার পদার্থবিদ্যার ইতিহাসের একটা অত্যন্ত গুরুত্বপূর্ণ অধ্যায়। এই আবিষ্কার ডিরাকের অসাধারণ মনীষা এবং বৈজ্ঞানিক দূরদৃষ্টির জাজ্বল্যমান পরিচায়ক।

উপরের আলোচনায় দেখা গেছে যে, পজ়িট্রন সৃষ্টি করতে হলে ইলেকট্রনপূর্ণ ঋণাত্মক শক্তি অবস্থার মধ্যে একটা গহ্বর সৃষ্টি করার প্রয়োজন। প্রকৃতিতে সমস্ত ঋণাত্মক শক্তি অবস্থাই ইলেকট্রন দ্বারা পূর্ণ থাকে। পাউলি অপবর্জন তত্ত্ব অনুসারে নূতন কোন ইলেকট্রন সেখানে আসতে পারে না। সুতরাং এদের মধ্যে কোন একটি ইলেকট্রনকে অপসৃত করতে হলে সেটিকে ধনাত্মক শক্তি অবস্থায় সংক্রামিত করা প্রয়োজন। এইরূপ সংক্রমণ সম্ভব হয় যদি উক্ত ঋণাত্মক শক্তি সম্পন্ন ইলেকট্রনটি কোনক্রমে $2m_0c^2$ বা ততোধিক শক্তি অর্জন করতে পারে ( 14·3 চিত্র দ্রষ্টব্য )। অর্থাৎ যদি এই ইলেকট্রনটি $2m_0c^2$ অপেক্ষা অধিকতর শক্তি সম্পন্ন তড়িৎচুম্বকীয় বিকিরণ ( $\gamma$-রশ্মি ) শোষণ করে তাহলেই সেটি ধনাত্মক শক্তি অবস্থায় সংক্রামিত হতে পারে। সংক্রমণের পরে উক্ত ইলেকট্রনটি সাধারণ প্রকৃতিলব্ধ ইলেকট্রনের ন্যায় আচরণ করবে। সংগে সংগে ঋণাত্মক শক্তি অবস্থায় সৃষ্ট গহ্বরটিও পজ়িট্রনের ন্যায় আচরণ করবে। অর্থাৎ $2m_0c^2 = 1{\cdot}02$ মি-ই-ভো অপেক্ষা উচ্চতর শক্তি সম্পন্ন $\gamma$-রশ্মির ক্রিয়ার ফলে যুগপৎ একটি ইলেকট্রন-পজ়িট্রন যুগল (Electron-Positron Pair) সৃষ্ট হবে।

ইলেকট্রন-পজ়িট্রন যুগল সাধারণতঃ পরমাণু কেন্দ্রকের খুব নিকটে কেন্দ্রকের আধানজনিত তড়িৎক্ষেত্রের মধ্যে উৎপন্ন হয়। অর্থাৎ 1·02 মি-ই-ভো অপেক্ষা উচ্চতর শক্তি সম্পন্ন $\gamma$-রশ্মি যখন কোন পদার্থের মধ্য

দিয়ে পরিভ্রমণ করে, তখন কেন্দ্রকের তড়িৎক্ষেত্রের সংগে বিক্রিয়ার ফলে $\gamma$-ফোটনগুলি সময়ে সময়ে ইলেকট্রন এবং পজিট্রন, এই দুটি পদার্থ কণিকায় রূপান্তরিত হয়। সুতরাং যুগল-উৎপাদন (Pair Creation) প্রক্রিয়া হচ্ছে শক্তির পদার্থে রূপান্তরের নিদর্শন।

যুগল উৎপাদনের সম্ভাব্যতা পূর্বে আলোচিত অন্য দুই প্রক্রিয়ার মত সাধারণতঃ 'যুগল উৎপাদন প্রস্থচ্ছেদ' (Cross Section for Pair Creation) নামক সংখ্যার দ্বারা নির্দেশ করা হয়। পদার্থের অভ্যন্তরে একক ক্ষেত্রফলে অবস্থিত একটি মাত্র পরমাণুর সংগে বিক্রিয়ার ফলে একটি $\gamma$-ফোটনের যুগল উৎপাদনের সম্ভাব্যতাকে বলা হয় যুগল উৎপাদন প্রস্থচ্ছেদ। এই প্রস্থচ্ছেদ ( $\sigma_p$ ) নির্ভর করে $\gamma$-রশ্মির শক্তির উপরে এবং পদার্থের পরমাণবিক সংখ্যার উপরে। 1·02 মি-ই-ভো অপেক্ষা কম শক্তি সম্পন্ন $\gamma$-রশ্মি যুগল উৎপাদন করতে পারে না। $\gamma$-শক্তির মান 1·02 মি-ই-ভো অপেক্ষা বেশী হলে যুগল-উৎপাদন প্রস্থচ্ছেদ প্রথমে খুব মন্থর হারে এবং উচ্চতর শক্তিতে বেশ দ্রুত বৃদ্ধি পায়। যদি পদার্থের একক আয়তনে বর্তমান পরমাণুর সংখ্যা $n$ হয়, তাহলে ( 14·4 ) সমীকরণের অনুরূপে আমরা 'যুগল উৎপাদন গুণাংক' ( Pair Creation Coefficient ) $\mu_p$ এবং যুগল উৎপাদন প্রস্থচ্ছেদের মধ্যে নিম্নলিখিত সম্পর্ক পাই ঃ

$$\sigma_p = \frac{\mu_p}{n}$$

(14·2) চিত্রে $\gamma$-শক্তির সংগে যুগল উৎপাদন গুণাংক ($\mu_p$) পরিবর্তনের লেখচিত্র প্রদর্শিত হয়েছে।

যুগল-উৎপাদন প্রস্থচ্ছেদ পদার্থের পরমাণবিক সংখ্যার বর্গের সমানুপাতিক ($\sigma_p \propto Z^2$)। সুতরাং সীসা ($Z=82$) প্রভৃতি উচ্চ $Z$ সম্পন্ন পদার্থের মধ্যে যুগল উৎপাদনের সম্ভাব্যতা অ্যালুমিনিয়াম ($Z=13$) ইত্যাদি নিম্ন $Z$ সম্পন্ন পদার্থের তুলনায় অনেক বেশী হয়।

উচ্চশক্তি সম্পন্ন $\gamma$-রশ্মি কর্তৃক সৃষ্ট ইলেকট্রন এবং পজিট্রনের শক্তি পরিমাপ করে $\gamma$-শক্তি নির্ণয় করা যায়। যুগল বর্ণালীমাপক (Pair Spectrometer) নামক যন্ত্রের সাহায্যে এই ভাবে $\gamma$-শক্তি নিরূপণ করা সম্ভব।

## 14.6 : ইলেকট্রন-পজিট্রন বিনাশ

ইলেকট্রন-পজিট্রন যুগল কণিকা সৃষ্টির বিপরীত প্রক্রিয়া হচ্ছে ইলেকট্রন-পজিট্রন বিনাশ (Annihilation)। পজিট্রন সৃষ্টির পর পদার্থের মধ্যে আয়নন ইত্যাদি ক্রিয়ার ফলে সেটির শক্তি ক্ষয় হয়। অবশেষে যখন পজিট্রনটি প্রায় সম্পূর্ণ শক্তিহীন হয়ে পড়ে তখন স্থির অবস্থায় বর্তমান কোন ইলেকট্রনের সংগে সেটি বিক্রিয়া (Interact) করে। এই বিক্রিয়ার ফলে ইলেকট্রন এবং পজিট্রন দুটি কণিকাই বিনষ্ট হয়ে যায় এবং তাদের মোট ভরশক্তি ($2m_0c^2$) দুটি বিপরীতগামী ফোটনে রূপান্তরিত হয়। প্রতিটি ফোটনের শক্তি $m_0c^2$ হয়। যেহেতু ইলেকট্রন এবং পজিট্রন দুটি কণিকাই স্থির অবস্থায় বিক্রিয়া করে, সুতরাং এক্ষেত্রে প্রাথমিক ভরবেগ শূন্য হয়। সুতরাং ভরবেগ সংরক্ষণ সূত্র অনুযায়ী বিক্রিয়ার পরে চরম ভরবেগও শূন্য হওয়া প্রয়োজন। সেইজন্য ইলেকট্রন এবং পজিট্রনের মোট ভরশক্তি $2m_0c^2$ দুটি সমশক্তি সম্পন্ন, অর্থাৎ দুটি সমান ভরবেগ সম্পন্ন বিপরীতগামী ফোটনে রূপান্তরিত হয়। এইভাবে উৎপন্ন ফোটনকে বলা হয় 'বিনাশজনিত বিকিরণ' (Annihilation Radiation)। ডিরাক্ তত্ত্ব অনুযায়ী ইলেকট্রন পজিট্রন বিনাশ নিম্নলিখিত উপায়ে প্রতীয়মান হয়। পজিট্রনটি যত শক্তি হারায়, ঋণাত্মক শক্তি অবস্থায় সৃষ্ট গহ্বরটি ততই উপরের দিকে উঠে আসে। অবশেষে সেটি যখন সম্পূর্ণ শক্তিহীন হয়, তখন গহ্বরটি ($-m_0c^2$) শক্তিস্তরে উন্নীত হয়। এই সময় একটি স্থির ইলেকট্রন, যার মোট শক্তি হচ্ছে $+m_0c^2$, নিম্নাভিমুখী সংক্রমণ করে ঋণাত্মক অবস্থায় বর্তমান উক্ত রিক্ত স্থান পূর্ণ করে ফেলে। ফলে ধনাত্মক অবস্থা থেকে একটি ইলেকট্রন বিলুপ্ত হয়ে যায় এবং সংগে সংগে ঋণাত্মক অবস্থায় সৃষ্ট গহ্বরটিও ( অর্থাৎ পজিট্রনটিও ) বিলুপ্ত হয়। এই সংক্রমণের ফলে ইলেকট্রনের মোট শক্তি পরিবর্তন ($m_0c^2 + m_0c^2$) বা $2m_0c^2$ দুটি $\gamma$-রশ্মির আকারে নিঃসৃত হয় ( 14·3 চিত্র দ্রষ্টব্য )।

## 14.7 : পদার্থের মধ্যে $\gamma$-রশ্মির বিভিন্ন বিক্রিয়া পদ্ধতির তুলনা

(14·3) থেকে (14·5) পর্য্যন্ত অনুচ্ছেদে প্রদত্ত আলোচনা থেকে দেখা যায় যে নির্দিষ্ট উচ্চ $Z$ সম্পন্ন পদার্থের ক্ষেত্রে নিম্ন শক্তির $\gamma$-রশ্মি ( $h\nu < 0·4$ মি-ই-ভো ) প্রধানতঃ আলোক-তাড়িত ক্রিয়ার দ্বারা শক্তি হারায়। অপর পক্ষে 0·6 মি-ই-ভো থেকে 2·5 মি-ই-ভো শক্তি সীমার মধ্যে $\gamma$-রশ্মি প্রধানতঃ

কম্পটন প্রক্রিয়ার দ্বারা শক্তিক্ষয় করে। পরিশেষে উচ্চশক্তি সম্পন্ন $\gamma$-রশ্মি ($h\nu > 10$ মি-ই-ভো) প্রধানতঃ যুগল-উৎপাদন প্রক্রিয়ায় শক্তিক্ষয় করে। (14·2) চিত্রে উপরে আলোচিত তিন প্রকার পদ্ধতির সমন্বয়ে $\gamma$-রশ্মির শোষণের মোট সম্ভাব্যতার (মোট শোষণ গুণাংকের) লেখচিত্র প্রদর্শিত হয়েছে। যদি $\mu_{ph}$, $\mu_c$ এবং $\mu_p$ যথাক্রমে আলোক-তাড়িত গুণাংক, কম্পটন বিক্ষেপ গুণাংক এবং যুগল-উৎপাদন গুণাংক নির্দেশ করে, তাহলে মোট গুণাংক হয়

$$\mu = \mu_{ph} + \mu_c + \mu_p$$

$\mu$ সংখ্যাটি সেমি$^{-1}$ মাত্রা সম্পন্ন হয়।

যদি $I_0$ প্রাথমিক তীব্রতা সম্পন্ন $\gamma$-রশ্মিগুচ্ছ $x$ বেধ সম্পন্ন কোন পদার্থের ভিতর দিয়ে পার হয়ে যায়, তাহলে নির্গত $\gamma$-রশ্মির তীব্রতা হয়

$$I = I_0 e^{-\mu x}$$

এখানে $\mu$ হচ্ছে পদার্থটির 'মোট রৈখিক শোষণ গুণাংক'। যদি $x = d$ বেধ সম্পন্ন পদার্থের মধ্য দিয়ে যাবার পর $\gamma$-রশ্মির তীব্রতা অর্ধেক হয়ে যায়, তাহলে আমরা পাই

$$\mu = \frac{\ln 2}{d} = \frac{0{\cdot}693}{d}$$

$d$ হচ্ছে 'অর্ধমান বেধ' (Half Value Thickness)। পরীক্ষার দ্বারা $d$ পরিমাপ করে $\mu$ নির্ণয় করা যায়। নির্দিষ্ট শক্তি সম্পন্ন $\gamma$-রশ্মির ক্ষেত্রে $\mu$ এর মান নির্দিষ্ট হয়। এক্ষেত্রে তীব্রতা ($I$) এবং বেধের ($x$) লেখচিত্র সূচক (Exponential) প্রকৃতি সম্পন্ন হয়। যদি $\ln I/I_0$ এবং $x$ এর লেখচিত্র আঁকা যায় তাহলে লেখচিত্রটি সরলরেখা হয়। এই সরলরেখার নতি থেকেও রৈখিক শোষণ গুণাংক $\mu$ পাওয়া যায়। উদাহরণস্বরূপ $Co^{60}$ আইসোটোপ থেকে 1·17 এবং 1·33 মি-ই-ভো শক্তি সম্পন্ন দুটি $\gamma$-রশ্মি নিঃসৃত হয়। এদের গড় শক্তি হচ্ছে 1·25 মি-ই-ভো। (14·2) চিত্র থেকে 1·25 মি-ইভো $\gamma$-রশ্মির সীসার মধ্যে শোষণ গুণাংক পাওয়া যায় $\mu = 0.65$ সেমি$^{-1}$।
সুতরাং $d = \frac{0{\cdot}693}{\mu} = 1{\cdot}066$ সেমি বেধ সম্পন্ন সীসার পাত এই $\gamma$-রশ্মির তীব্রতা অর্ধেক পরিমাণে কমিয়ে দেবে। যদি সীসার পাতের বেধ এর দ্বিগুণ হয়, তাহলে $\gamma$-রশ্মির তীব্রতা প্রাথমিক তীব্রতার এক চতুর্থাংশ হয়ে যায়। সেণ্টিমিটারের পরিবর্তে যদি গ্রাম/সেমি$^2$ এককে বেধের মান প্রকাশ করা যায়

তাহলে উক্ত γ-রশ্মির ক্ষেত্রে সীসার অর্ধমান বেধ (Half Value Thickness) হয় $d \times \rho = 1{\cdot}066 \times 11{\cdot}35 = 12{\cdot}1$ গ্রাম/সেমি$^2$ ।

নিম্ন $Z$ সম্পন্ন পদার্থের ক্ষেত্রে ( যথা অ্যালুমিনিয়াম ), 0·05 থেকে 15 মি-ই-ভো পর্যন্ত বিস্তৃত প্রশস্ততর শক্তি সীমার মধ্যে γ-রশ্মি প্রধানতঃ কম্পটন প্রক্রিয়ার দ্বারা শক্তিক্ষয় করে। $h\nu < 0{\cdot}05$ মি-ই-ভো হলে আলোক-তাড়িত ক্রিয়া এবং $h\nu > 15$ মি-ই-ভো হলে যুগল-উৎপাদন ক্রিয়া প্রাধান্য লাভ করে।

## 14.8 : $\gamma$-রশ্মির শক্তি নির্ণয়

ইতিপূর্বে দেখা গেছে যে γ-রশ্মি কর্তৃক নিঃসৃত ফোটো-ইলেকট্রন, কম্পটন ইলেকট্রন বা ইলেকট্রন-পজিট্রন যুগলের শক্তি পরিমাপ করে γ-শক্তি নির্ণয় করা যায়। এছাড়া যে সব ক্ষেত্রে আভ্যন্তরীণ অবস্থান্তরিত ইলেকট্রন (Internal Conversion Electron) নিঃসৃত হয়, সেক্ষেত্রে চৌম্বক বর্ণালীমাপক যন্ত্রের সাহায্যে এই ইলেকট্রনগুলির শক্তি পরিমাপ করেও γ-রশ্মির শক্তি নির্ণয় করা যায় ( 13·5 অনুচ্ছেদ দ্রষ্টব্য )। যদি একটি কেন্দ্রকের দুটি শক্তিস্তরের শক্তি হয় যথাক্রমে $\varepsilon_1$ এবং $\varepsilon_2$, তাহলে এদের মধ্যে সংক্রমণের ফলে নিঃসৃত γ-রশ্মির শক্তি হয়

$$h\nu = \varepsilon_1 = \varepsilon_2$$

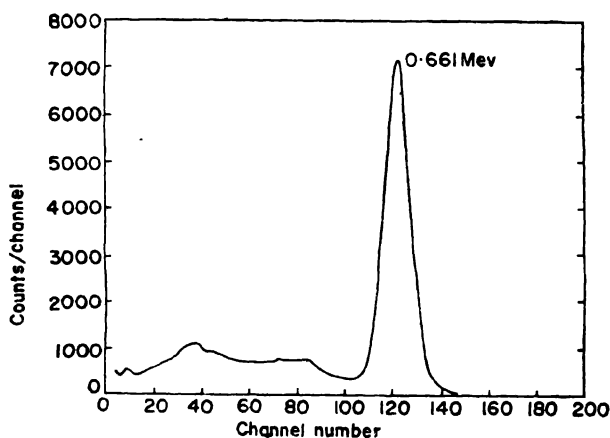
যদি γ-রশ্মির পরিবর্তে উক্ত সংক্রমণের ফলে একটি কক্ষীয় ইলেকট্রন ( যথা K ইলেকট্রন ) নিঃসৃত হয়, তাহলে ইলেকট্রনটির গতিশক্তি হয় (13·6 সমীকরণ দ্রষ্টব্য ) ঃ

$$E_K = \varepsilon_1 - \varepsilon_2 - W_K = h\nu - W_K$$

এখানে $W_K$ হচ্ছে K কক্ষীয় ইলেকট্রনের বন্ধনশক্তি। চৌম্বক বর্ণালীমাপক যন্ত্রের সাহায্যে $E_K$ পরিমাপ করে γ-শক্তি $h\nu$ নির্ণয় করা সম্ভব। এই পদ্ধতিতে γ-শক্তির খুব সঠিক পরিমাপ সম্ভব।

বর্তমানে চমক বর্ণালীমাপক যন্ত্র (Scintillation Spectrometer) ব্যবহার করে খুব সঠিক ভাবে γ-শক্তি নির্ণয় করা হয়। ইতিপূর্বে আমরা দেখেছি যে রাদারফোর্ড এবং তাঁর সমকর্মীবৃন্দ একটি ZnS পর্দার উপরে আপতিত α-কণিকা কর্তৃক উৎপন্ন দীপ্তির চমক গণনা করে α-কণিকার সংখ্যা নির্ণয় করেন। বর্তমান কালে চমক উৎপাদক ফসফরের (Phosphor)

সংগে বিশেষভাবে নির্মিত আলোক-তড়িত পরিবর্ধক কোষ (Photo Multiplier Cell) ব্যবহার করে ইলেকট্রনিক পদ্ধতিতে দীপ্তির চমক গণনা করার উন্নত ধরণের পদ্ধতি উদ্ভাবিত হয়েছে ( 15·5 অনুচ্ছেদ দ্রষ্টব্য )। এই ব্যবস্থার সাহায্যে চমক উৎপাদনকারী বিকিরণের ( যথা γ-বিকিরণের ) শক্তিও নির্ণয় করা যায়।

NaI (Tl) বা থ্যালিয়াম দ্বারা সক্রিয়কৃত (Thallium Activated) NaI কেলাসের মধ্য দিয়ে পরিভ্রমণশীল γ-রশ্মি ফোটো-ইলেকট্রন বা কম্পটন প্রতিক্ষিপ্ত ইলেকট্রন নিঃসৃত করে। এই ইলেকট্রনগুলি উক্ত কেলাসের মধ্যে পরিভ্রমণ কালে কেলাসের অণু বা পরমাণুর সংগে বিক্রিয়ার দ্বারা বহু সংখ্যক দৃশ্যমান বা অতিবেগনী ফোটন নিঃসৃত করে। এই ফোটনগুলিকেই প্রকৃতপক্ষে দীপ্তির চমক (Scintillations) হিসাবে দেখা যায়। এদের সংখ্যা নিঃসারক ইলেকট্রনের শক্তির উপর নির্ভর করে। যেহেতু এই শক্তি নির্ভর করে γ-শক্তির উপর, সুতরাং নিঃসৃত দৃশ্যমান বা অতিবেগনী ফোটনের

চিত্র 14·4

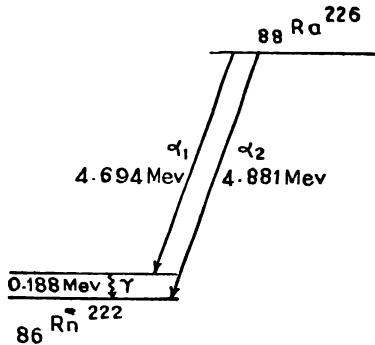
চমক বর্ণালীমাপক যন্ত্রের সাহায্যে প্রাপ্ত ঝলক বিস্তার বণ্টনের লেখচিত্র।

সংখ্যা γ-শক্তির উপর নির্ভরশীল হয়। এই ফোটনগুলি একটি আলোক-তাড়িত পরিবর্ধক কোষের (Photo Multiplier Cell) ক্যাথোডের উপরে আপতিত হয়ে ইলেকট্রন নিঃসৃত করে। পরিবর্ধক কোষের মধ্যে ইলেকট্রনের সংখ্যা বিশেষ ব্যবস্থার সাহায্যে দশলক্ষ গুণ বা আরও বেশী পরিবর্ধিত হয়।

এইভাবে উৎপন্ন ইলেকট্রন প্রবাহ যে ক্ষণস্থায়ী তড়িৎ ঝলক (Pulse) উৎপন্ন করে, তার বিভবের বিস্তার (Amplitude) নির্ভর করে $\gamma$-শক্তির উপরে। 'ঝলক বিস্তার-নির্বাচক' (Pulse Amplitude Selector) নামক বিশেষ ইলেকট্রনিক যন্ত্রের সাহায্যে বিভিন্ন বিস্তার সম্পন্ন এইরূপ ক্ষণস্থায়ী তড়িৎ ঝলকগুলির সংখ্যা নিরূপণ করা যায়। বিভব-বিস্তারের সঙ্গে উপরোক্ত সংখ্যার পরিবর্তন (14·4) চিত্রে প্রদর্শিত হয়েছে। চিত্র থেকে দেখা যায় যে বিভব বিস্তারের নির্দিষ্ট মানে একটি তীক্ষ্ণ চূড়া উৎপন্ন হয়। এই চূড়াটি $\gamma$-রশ্মি কর্তৃক নিঃসৃত ফোটো-ইলেকট্রনগুলি দ্বারা উৎপন্ন হয়। অন্য কোন পদ্ধতিতে পরিমিত শক্তি সম্পন্ন একটি $\gamma$-রশ্মি উৎস ব্যবহার করে সাধারণতঃ যন্ত্রটি ক্রমাংকিত (Calibrate) করা হয় এবং তারপর অন্যান্য অজ্ঞাত $\gamma$-রশ্মির শক্তি নির্ণয় করা হয়।

চমক সংখ্যায়ক সম্বন্ধে (15·5) অনুচ্ছেদে আরও বিস্তারিত আলোচনা করা হবে।

### 14.9 : $\gamma$-রশ্মি বর্ণালী এবং কেন্দ্রকের শক্তিস্তর

$\alpha$ বা $\beta$ কণিকা নিঃসরণের ফলে কিংবা অন্য কোন কারণে উত্তেজিত অবস্থায় সৃষ্ট কেন্দ্রকের নিম্নতর শক্তিস্তরে সংক্রমণের ফলে $\gamma$-রশ্মি নিঃসৃত হয়,

চিত্র 14·5

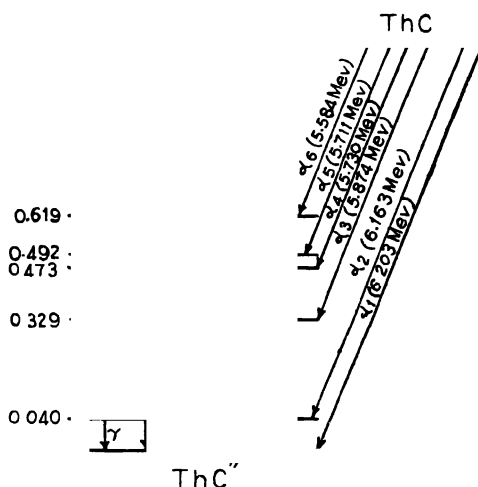
*$Ra^{226}$ কেন্দ্রকের $\alpha$-বিঘটনের ক্ষেত্রে $\gamma$-রশ্মি উৎপাদক সংক্রমণের নিদর্শন।*

একথা পূর্বেই উল্লেখ করা হয়েছে। অনেক সময় একই তেজস্ক্রিয় কেন্দ্রক থেকে একাধিক শক্তি সম্পন্ন $\gamma$-রশ্মিগুচ্ছ নিঃসৃত হয়। এর ফলে অবশিষ্ট কেন্দ্রক

বিভিন্ন শক্তিস্তরে সৃষ্ট হয়। এইসব শক্তিস্তরের মধ্যে সংক্রমণের ফলে নিঃসৃত $\gamma$-রশ্মি সমূহের শক্তি এবং নিঃসৃত $\alpha$-রশ্মিগুচ্ছগুলির পারস্পারিক শক্তি ব্যবধানের মধ্যে সংগতি থাকার কথা। অনুরূপে অনেক কেন্দ্রক থেকে একাধিক উচ্চতম শক্তি সম্পন্ন $\beta$-গুচ্ছ নিঃসৃত হতে দেখা যায়। এদের উচ্চতম শক্তির পারস্পারিক ব্যবধান এবং এইসব ক্ষেত্রে নিঃসৃত $\gamma$-শক্তির মধ্যেও সংগতি থাকা উচিত।

উদাহরণস্বরূপ $\mathrm{Ra}^{226}$ আইসোটোপের $\alpha$-বিঘটনের কথা বিবেচনা করা যেতে পারে। এই বিঘটন নিম্নলিখিত উপায়ে নির্দেশিত করা যায় ঃ

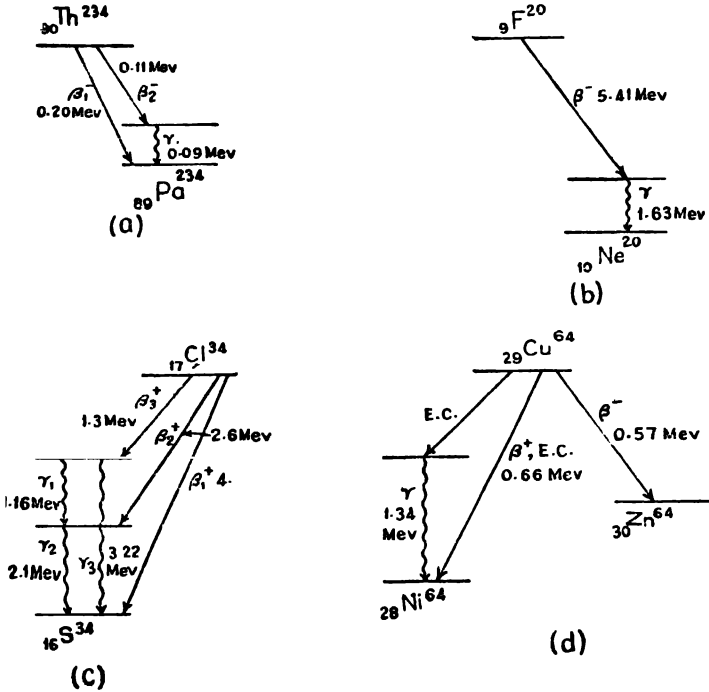
$$\mathrm{Ra}^{226} \qquad \mathrm{Rn}^{222}$$

এক্ষেত্রে দুটি $\alpha$-রশ্মিগুচ্ছ নিঃসৃত হয়। এদের শক্তি হচ্ছে 4·795 এবং 4·611 মি-ই-ভো। $\alpha$-বিঘটনের ফলে সৃষ্ট কেন্দ্রক $\mathrm{Rn}^{222}$ থেকে 0·188 মি-ই-ভো

চিত্র 14·6

ThC কেন্দ্রকের $\alpha$-বিঘটনের ক্ষেত্রে $\gamma$-রশ্মি উৎপাদক সংক্রমণ সমূহের নিদর্শন।

শক্তি সম্পন্ন $\gamma$-রশ্মি নিঃসৃত হয়। সৃষ্ট মৌলের প্রতিক্ষেপ বিবেচনা করলে উপরোক্ত দুইক্ষেত্রে $\alpha$-বিঘটন শক্তির মান হয় ( 12·9 সমীকরণ দ্রষ্টব্য ) যথাক্রমে 4·881 এবং 4·694 মি-ই-ভো। এই দুটি $\alpha$-বিঘটন শক্তির পার্থক্য

হচ্ছে 0·187 মি-ই-ভো। এই শক্তি-পার্থক্য এবং উপরে প্রদত্ত γ-শক্তির মধ্যে খুব ভাল সংগতি পাওয়া যায়। (14·5) চিত্রে উপরোক্ত α এবং γ সংক্রমণের ক্ষেত্রে শক্তিস্তরের চিত্ররূপ প্রদর্শিত হয়েছে। চিত্র থেকে দেখা যায় যে $Ra^{226}$ কেন্দ্রকটি α-বিঘটনের ফলে হয় $Rn^{222}$ কেন্দ্রকের ভৌম অবস্থায় (Ground State) আর না হয় 0·188 মি-ই-ভো উত্তেজিত অবস্থায় সংক্রমিত হয়। শেষোক্ত ক্ষেত্রে $Rn^{222}$ কেন্দ্রকটি 0·188 মি-ই-ভো শক্তি সম্পন্ন γ-রশ্মি নিঃসৃত করে ভৌম স্তরে সংক্রমিত হয়।

(12·16) অনুচ্ছেদে α-কণিকার সূক্ষ্ম গঠনের (Fine Structure) উল্লেখ করা হয়েছে। উদাহরণস্বরূপ $ThC \xrightarrow{\alpha} ThC''$ সংক্রমণের ক্ষেত্রে পাঁচটি

চিত্র 14·7

$UX_1$ ($Th^{234}$), $F^{20}$, $Cl^{34}$ এবং $Cu^{64}$ কেন্দ্রকগুলির ক্ষেত্রে β বিঘটন সংশ্লিষ্ট γ-রশ্মি উৎপাদনের নিদর্শন।

বিভিন্ন শক্তি সম্পন্ন $\alpha$-গুচ্ছ পাওয়া যায়। এদের শক্তি হচ্ছে যথাক্রমে 6·11, 6·07, 5·76, 5·62, এবং 5·60 মি-ই-ভো। এক্ষেত্রে নিঃসৃত $\gamma$-রশ্মিগুলির শক্তি হচ্ছে 0·491, 0·471, 0·451, 0·431, 0·327, 0·287, 0·162 এবং 0·040 মি-ই-ভো। (14·6) চিত্রে এইসব সংক্রমণের ক্ষেত্রে প্রযোজ্য শক্তিস্তরগুলি প্রদর্শিত হয়েছে। এই চিত্র থেকে বিভিন্ন $\alpha$-গুচ্ছ এবং $\gamma$-রশ্মির উৎপত্তির কারণ সহজেই প্রতীয়মান হয়।

$\beta$-বিঘটন নিরীক্ষণ করেও কেন্দ্রকের শক্তিস্তরগুলির প্রকৃতি নির্ণয় করা যায়। উদাহরণস্বরূপ $UX_1$ $(Th^{234})$ থেকে 0·20 এবং 0·11 মি-ই-ভো উচ্চতম শক্তি সম্পন্ন দুই প্রকার $\beta$-গুচ্ছ নিঃসৃত হতে দেখা যায়। এদের শক্তি ব্যবধান হয় 0·09 মি-ই-ভো। এক্ষেত্রে সৃষ্ট মৌল $UX_2$ $(Pa^{234})$ থেকে 0·09 মি-ই-ভো শক্তি সম্পন্ন $\gamma$-রশ্মি নিঃসৃত হতে দেখা যায়। এই সংক্রমণের ক্ষেত্রে প্রযোজ্য শক্তিস্তর চিত্র (14·7$a$) চিত্রে প্রদর্শিত হয়েছে। (14·7) চিত্রে আরও কয়েকটি $\beta$-সংক্রমণের ক্ষেত্রে প্রযোজ্য শক্তিস্তর চিত্র প্রদর্শিত হয়েছে।

# পরিচ্ছেদ 15

# কেন্দ্রকীয় বিকিরণ নির্দেশক যন্ত্রাবলী

## 15.1 : সূচনা

তেজস্ক্রিয় পদার্থ নিঃসৃত $\alpha$, $\beta$ বা $\gamma$ বিকিরণ নির্দেশ করার জন্য এবং এই সমস্ত বিকিরণের তীব্রতা পরিমাপের জন্য নানাবিধ সূক্ষ্ম যন্ত্র উদ্ভাবিত হয়েছে। উপরোক্ত বিকিরণগুলি ছাড়াও পরবর্তী যুগে নিউট্রন, মেসন, পজিট্রন এবং ভারী আয়ন-উৎপাদক বিকিরণ সমূহ, যথা প্রোটন, ডয়টেরন, প্রভৃতির জন্য বিভিন্ন প্রকার নির্দেশক যন্ত্রও উদ্ভাবিত হয়। এই সব যন্ত্রের কার্য পদ্ধতি প্রধানতঃ বিকিরণের আয়ন উৎপাদন ক্ষমতা, চমক (Scintillation) উৎপাদন ক্ষমতা বা বিশেষ ধরণের ফোটোগ্রাফিক প্লেটের উপর বিক্রিয়া করার ক্ষমতার উপরে নির্ভর করে। নানাপ্রকার বিকিরণ নির্দেশক (Detector) যন্ত্রের মধ্যে ইলেকট্রস্কোপ, মেঘ-কক্ষ, আয়নন-কক্ষ, গাইগার-মূলার সংখ্যায়ক, চমক-উৎপাদক সংখ্যায়ক প্রভৃতি ঐতিহাসিক দিক থেকে খুব গুরুত্বপূর্ণ। তাছাড়া বিশেষ ধরণের কেন্দ্রকীয় অবদ্রব ফোটোগ্রাফিক প্লেট (Nuclear Emulsion Photographic Plate), চেরেনকভ সংখ্যায়ক (Cerenkov Counter), অর্ধপরিবাহী নির্দেশক (Semi Conductor Detector), স্ফুলিংগ-কক্ষ (Spark Chamber) এবং বুদ্‌বুদ-কক্ষ (Bubble Chamber) প্রভৃতি যন্ত্রগুলিও বর্তমান যুগে বহু ক্ষেত্রে ব্যবহৃত হয়।

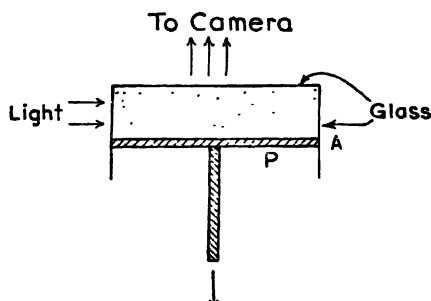
এদের মধ্যে ইলেকট্রস্কোপ যন্ত্রটি প্রাথমিক যুগে তেজস্ক্রিয় বিকিরণ নির্দেশক হিসাবে বহুল পরিমাণে ব্যবহৃত হত। ইলেকট্রস্কোপের অভ্যন্তরস্থ গ্যাসের মধ্যে যখন কোন আয়ন উৎপাদক বিকিরণ, যথা $\alpha$, $\beta$ বা $\gamma$ বিকিরণ প্রবেশ করে তখন গ্যাসটি আয়নিত হয়। ফলে আহিত ইলেকট্রস্কোপের স্বর্ণপত্র দুটি আধান হারিয়ে ক্রমশঃ নিমীলিত হয়ে যায়। নিমীলনের হার নির্ভর করে অনুপ্রবিষ্ট বিকিরণের তীব্রতার উপরে। বেকেরেল, কুরী-দম্পতি, রাদারফোর্ড প্রভৃতি বিজ্ঞানীগণ এই সরল যন্ত্রটি ব্যবহার করে বহু যুগান্তরকারী তথ্য আবিষ্কার করেন। এছাড়া আয়নন কক্ষ (Ionization Chamber) যন্ত্রটি তেজস্ক্রিয় বিকিরণের নির্দেশক এবং তীব্রতা পরিমাপক

হিসাবে শুধু প্রাথমিক যুগে নয়, পরবর্তী যুগেও অনেক দিন পর্যন্ত ব্যবহার করা হয়। বর্তমান কালেও অনেক সময় এই যন্ত্রটির ব্যবহারের প্রয়োজনীয়তা দেখা যায়। ইলেকট্রস্কোপের প্রধান অসুবিধা হচ্ছে যে এর সাহায্যে তেজস্ক্রিয় বিকিরণ ব্যষ্টিগতভাবে (Individually) নির্দেশ করা সম্ভব হয় না। সেজন্য এই যন্ত্রের ব্যবহার বর্তমানে সম্পূর্ণ বিলুপ্ত হয়ে গেছে।

পরবর্তী কয়েকটি অনুচ্ছেদে বিশেষ বিশেষ কতকগুলি কেন্দ্রকীয় বিকিরণ নির্দেশক যন্ত্রের বর্ণনা দেওয়া হবে।

## 15.2 : উইলসন মেঘ-কক্ষ

১৯১১ সালে রাদারফের্ডের সহযোগী উইলসন (C.T.R. Wilson) এই যন্ত্র উদ্ভাবিত করেন। এই যন্ত্রের সাহায্যে ব্যষ্টিগতভাবে প্রতিটি $\alpha$ বা $\beta$ কণিকার ভ্রমণপথ (Track) দৃশ্যমান করে তোলা সম্ভবপর হয় এবং ক্যামেরার সাহায্যে এইসব ভ্রমণপথের আলোকচিত্র গ্রহণ করাও সম্ভব হয়।

(15·1) চিত্রে প্রদর্শিত এই যন্ত্রের মধ্যে A একটি আবদ্ধ কক্ষ যার মধ্যে কোন উদ্বায়ী (Volatile) তরলের বাষ্প মিশ্রিত বায়ু বা অন্য কোন গ্যাস আবদ্ধ থাকে। A কক্ষের সম্মুখের এবং পার্শ্বের গাত্র কাঁচ-নির্মিত হয়, যাতে কক্ষের অভ্যন্তর ভালভাবে দৃশ্যমান হয়। এই কক্ষের পশ্চাৎভাগে অবস্থিত P

চিত্র 15·1

মেঘকক্ষের কার্যপ্রণালী।

পিস্টনের সাহায্যে কক্ষের আবদ্ধ গ্যাসকে সংনমিত (Compress) বা প্রসারিত (Expand) করার ব্যবস্থা থাকে। P পিস্টনের উপরিতল সাধারণতঃ

কৃষ্ণবর্ণ ফেল্ট (Felt) বা অনুরূপ আচ্ছাদনের দ্বারা আবৃত থাকে, যাতে এর উপর থেকে কোন আলোক প্রতিফলিত হয়ে ক্যামেরার মধ্যে প্রবেশ না করতে পারে। যদি পিস্টনটিকে সহসা বাইরের দিকে টেনে নিয়ে A কক্ষের গ্যাসকে রুদ্ধতাপ (Adiabatic) অবস্থায় প্রসারিত করা যায়, তাহলে উক্ত গ্যাসের উষ্ণতা কমে যায়। নিম্নতর উষ্ণতায় অতিপৃক্ত (Super Saturated) হওয়ার জন্য গ্যাসের মধ্যেকার বাষ্প ক্ষুদ্র ক্ষুদ্র তরল বিন্দুর আকারে ঘনীভূত (Condensed) হয়ে যায়। গ্যাসের মধ্যে কিছু পরিমাণ ধূলিকণা বর্তমান থাকলে ঘনীভবন অপেক্ষাকৃত সহজে ঘটে। তাপীয় গতিবিদ্যার (Thermodynamics) সাহায্যে এর কারণ বোঝা যায়।

তাপীয় গতিবিদ্যা থেকে জানা আছে যে কোন তরলের উত্তল (Convex) পৃষ্ঠের উপরে সম্পৃক্ত বাষ্পীয় চাপ উক্ত তরলের সমতল পৃষ্ঠের উপরকার সম্পৃক্ত চাপ অপেক্ষা উচ্চতর হয়। এই দুই চাপের পার্থক্য $p$ হচ্ছে

$$p=\frac{2S}{R}\cdot\frac{\sigma}{\rho-\sigma}$$

এখানে $p$ হচ্ছে সম্পৃক্ত বাষ্পীয় চাপ, $S$ হচ্ছে তরলের পৃষ্ঠটান (Surface Tension) এবং $R$ হচ্ছে তরলের উত্তল পৃষ্ঠের বক্রতা-ব্যাসার্ধ (Radius of Curvature)। $\rho$ এবং $\sigma$ হচ্ছে যথাক্রমে তরল এবং তার বাষ্পের ঘনত্ব। স্পষ্টতঃ কোন ঘনীভূত তরল বিন্দুর বক্রতা-ব্যাসার্ধ যত কম হয় তার পৃষ্ঠের উপরে ক্রিয়াশীল সম্পৃক্ত বাষ্পীয় চাপ তত বেশী হয়। একথা সুবিদিত যে বাষ্পীয় চাপ যত বেশী হয় বাষ্পীভবন তত দ্রুত হয়। সুতরাং অতি ক্ষুদ্র তরল বিন্দুসমূহ খুব দ্রুত বাষ্পীভূত হয়ে যায়।

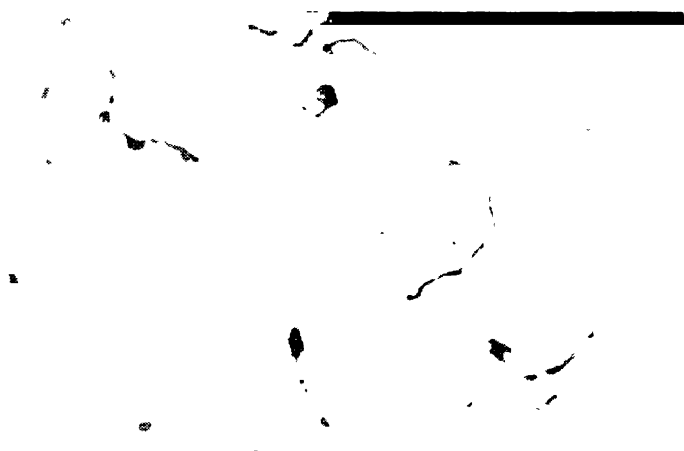
এখন A কক্ষের গ্যাসের মধ্যে যদি কিছু পরিমাণ ধূলিকণা বর্তমান থাকে, তাহলে রুদ্ধতাপ প্রসারণের (Adiabatic Expansion) ফলে অতিপৃক্ত (Super Saturated) বাষ্প সহজেই ঘনীভূত হতে পারে। কারণ ধূলিকণাগুলি অপেক্ষাকৃত বৃহদাকার ঘনীভবন কেন্দ্র (Nuclei of Condensation) হিসাবে কাজ করে। অপর পক্ষে যদি A কক্ষের গ্যাসের মধ্যে কোন ধূলিকণা না থাকে তাহলে রুদ্ধতাপ প্রসারণের ফলে শীতলীকৃত গ্যাসের মধ্যেকার বাষ্প ঘনীভূত হয়ে প্রথমে আণবিক আয়তনের তরলবিন্দু সৃষ্টি করবে। কিন্তু এগুলি এত ক্ষুদ্র যে ঘনীভবনের সংগে সংগে এরা বাষ্পীভূত হয়ে যাবে। ফলে ধূলিকণা মুক্ত গ্যাসের মধ্যের বাষ্প অতিপৃক্ত হলেও ঘনীভবন সম্ভবপর হয় না।

অপরপক্ষে এইরূপ ধূলিকণামুক্ত অতিপৃক্ত বাষ্প মিশ্রিত গ্যাসের মধ্যে যদি কোন আহিত কণিকা, যথা ধনাত্মক বা ঋণাত্মক আয়ন বর্তমান থাকে তাহলে এই আহিত কণিকাগুলি ধূলিকণার ন্যায় ঘনীভবন কেন্দ্র হিসাবে কাজ করে। ফলে এইসব আহিত কণিকা অতি ক্ষুদ্র (অর্থাৎ আণবিক আয়তন সম্পন্ন) হওয়া সত্ত্বেও এদের কেন্দ্র করে অতিপৃক্ত বাষ্প ঘনীভূত হতে শুরু করে। এক্ষেত্রে ঘনীভূত তরল বিন্দুগুলি আয়তনে অতি ক্ষুদ্র হলেও আধানের জন্য এরা খুব দ্রুত বাষ্পীভূত হয়ে যায় না। তাত্ত্বিক বিচারে দেখা যায় যে আহিত তরল বিন্দুর উপরকার সম্পৃক্ত বাষ্পীয় চাপ সম আয়তন আধানহীন বিন্দুর উপরকার বাষ্পীয় চাপ অপেক্ষা অনেক কম হয়। এর কারণ নিম্নলিখিত উপায়ে বোঝা যায়।

উপরের আলোচনা থেকে দেখা যায় যে ক্ষুদ্রায়তন আধানহীন তরল বিন্দুর দ্রুত বাষ্পীভবন হয়ে থাকে প্রধানতঃ তরলের পৃষ্ঠটানের জন্য। $R$ ব্যাসার্ধ সম্পন্ন তরল বিন্দুর মোট পৃষ্ঠশক্তির (Surface Energy) পরিমাণ প্রায় $4\pi R^2 S$ হয়। এখানে $S$ হচ্ছে তরলের পৃষ্ঠটান।

তরলের ব্যাসার্ধ কম হলে মোট পৃষ্ঠশক্তি কমে যায়। যেহেতু সমস্ত ভৌত মণ্ডলীর (Physical Systems) স্বাভাবিক ধর্ম অনুযায়ী নিম্নতম শক্তি সম্পন্ন অবস্থা প্রাপ্ত হবার প্রবণতা থাকে, সুতরাং যে কোন আধানহীন তরল বিন্দু স্বাভাবিক ধর্ম অনুসারে ক্রমশঃ ক্ষুদ্রতর আয়তন বিশিষ্ট হতে চায়, যাতে এর পৃষ্ঠশক্তি ক্রমশঃ হ্রাস পায়। অর্থাৎ পৃষ্ঠটানের প্রভাবে বাষ্পীভূত হয়ে আয়তনে ক্ষুদ্রতর হয়ে যাওয়াই হচ্ছে তরল বিন্দুগুলির স্বাভাবিক ধর্ম।

আহিত তরল বিন্দুর ক্ষেত্রে কিন্তু অবস্থাটা অন্য রকম। এক্ষেত্রে তরল বিন্দুর মোট শক্তি এর পৃষ্ঠশক্তি এবং কুলম্ব শক্তির সমষ্টির সমান হয়। $Q$ আধান সম্পন্ন গোলকাকার তরল বিন্দুর কুলম্ব শক্তির পরিমাণ $Q^2/2R$ হয়। $R$ বৃদ্ধির সংগে, অর্থাৎ তরল বিন্দুর আয়তন বৃদ্ধির সংগে, এই শক্তি হ্রাস পায়। অর্থাৎ তরল বিন্দুর উপরকার আধান এর পৃষ্ঠটানের প্রভাবকে কিছুটা বাতিল করে দেয়। সুতরাং আহিত তরল বিন্দুর উপরকার সম্পৃক্ত বাষ্পীয় চাপ অনেকটা কমে যায় এবং তার ফলে অপেক্ষাকৃত অনেক ক্ষুদ্রায়তন আহিত তরল বিন্দুও খুব তাড়াতাড়ি বাষ্পীভূত হয় না।

আহিত তরল বিন্দুর এই ধর্মের উপরেই উইলসন উদ্ভাবিত মেঘ-কক্ষের কার্যপ্রণালী নির্ভর করে। যদি কোন ধূলিকণামুক্ত অতিপৃক্ত বাষ্প মিশ্রিত গ্যাসের মধ্য দিয়ে একটি উচ্চশক্তি সম্পন্ন আয়ন উৎপাদক কণিকা (যথা $\alpha$ বা

চিত্র 15·2

মেঘ-কক্ষের সাহায্যে প্রাপ্ত বিভিন্ন প্রকার কণিকার ভ্রমণপথের আলোকচিত্র।

( কেম্‌ব্রিজ ইউনিভার্সিটি প্রেস কর্তৃক প্রকাশিত রাদারফোর্ড, চ্যাডউইক ও এলিস্ প্রণীত Radiations from Radioactive Substances গ্রন্থ থেকে প্রাপ্ত )

$\beta$ কণিকা ) বিচরণ করে, তাহলে কণিকাটি গ্যাসের অণুগুলির সংগে সংঘাতের ফলে তার ভ্রমণপথ বরাবর বহু সংখ্যক ধনাত্মক এবং ঋণাত্মক আধান সম্পন্ন আয়নযুগল উৎপন্ন করে। এইভাবে উৎপন্ন প্রতিটি আয়ন অতিপৃক্ত বাষ্পের ঘনীভবন কেন্দ্র হিসাবে কাজ করে। এদের উপরে ঘনীভূত আণবিক আয়তন সম্পন্ন তরল বিন্দুগুলি অপেক্ষাকৃত অনচ্ছ হওয়ার জন্য গ্যাসের মধ্য দিয়ে বিচরণশীল কণিকার ভ্রমণপথ (Track) সহজেই দৃষ্টিগোচর হয়। যথোপযুক্ত আলোকিত করার ব্যবস্থা থাকলে ক্যামেরার সাহায্যে এই ভ্রমণপথের আলোকচিত্র গ্রহণও সম্ভবপর হয়। ভ্রমণপথের উপরে মেঘের ন্যায় ক্ষুদ্র ক্ষুদ্র তরল বিন্দু সৃষ্ট হয় বলে এই যন্ত্রটিকে মেঘ-কক্ষ (Cloud Chamber) আখ্যা দেওয়া হয়।

উইলসন মেঘ-কক্ষে P পিষ্টনকে বাইরের দিকে টেনে নিয়ে এর অভ্যন্তরস্থ বাষ্পকে অতিপৃক্ত করা হয়। প্রাথমিক অবস্থায় কক্ষের মধ্যে যদি কিছু পরিমাণ ধূলিকণা বর্তমান থাকে, তাহলে অতিপৃক্ত বাষ্প এই ধূলিকণার উপরে ঘনীভূত হয়। ফলে সেগুলি ভারী হয়ে গিয়ে কক্ষতলের উপরে পড়ে যায়। পরপর কয়েকবার কক্ষস্থ গ্যাসকে প্রসারিত করে ধূলিকণা সমূহকে এইভাবে বিদূরিত করা হয়। এরপর কোন উচ্চশক্তি আহিত কণিকা যখন কক্ষের মধ্য দিয়ে বিচরণ করে, তখন সমকালীন রুদ্ধতাপ প্রসারণের ফলে কক্ষ মধ্যস্থ অতিপৃক্ত বাষ্প কণিকাটির ভ্রমণপথ সংলগ্ন আয়নগুলির উপরে ঘনীভূত হয়ে ভ্রমণপথকে দৃশ্যমান করে তোলে। যান্ত্রিক ব্যবস্থার সাহায্যে ঠিক একই মুহূর্তে ভ্রমণপথটিকে আলোকিত করে ক্যামেরার সাহায্যে এর আলোকচিত্র গ্রহণ করা হয়।

সাধারণতঃ দেখা যায় যে উৎপন্ন ঋণাত্মক আয়নগুলি ঘনীভবনের পক্ষে অধিকতর কার্যকরী হয়। ঋণাত্মক আয়নের ক্ষেত্রে চতুর্গুণ অতিপৃক্ততা (Super Saturation) সম্পন্ন বাষ্পের মধ্যে সহজেই ঘনীভবন শুরু হয়। ধনাত্মক আয়নের ক্ষেত্রে অন্ততঃ ছয়গুণ অতিপৃক্ততার প্রয়োজন হয়। বাষ্পের অতিপৃক্ততার পরিমাণ নির্ভর করে গ্যাসের প্রসারণ-অনুপাতের (Expansion Ratio) উপর। ঋণাত্মক আয়নের ক্ষেত্রে ঘনীভবনের জন্য প্রসারণ-অনুপাতের মান 1·26 এবং ধনাত্মক আয়নের ক্ষেত্রে উক্ত অনুপাতের মান 1·30 করা প্রয়োজন হয়।

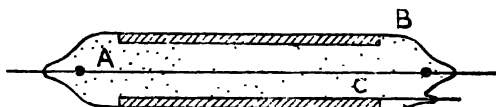
(12·10) চিত্রে মেঘ-কক্ষে উৎপন্ন $\alpha$-কণিকার ভ্রমণপথের আলোকচিত্র প্রদর্শিত হয়েছে। (15·2) চিত্রে অন্যান্য কয়েক প্রকার কণিকার ভ্রমণপথের মেঘ-কক্ষ আলোকচিত্রের নিদর্শন দেখান হয়েছে। $\beta$-কণিকার ভ্রমণপথ

$\alpha$-কণিকার তুলনায় অনেক ক্ষীণতর হয়। কারণ $\beta$-কণিকার আয়নন ক্ষমতা $\alpha$-কণিকার তুলনায় অনেক কম হয়। X-রশ্মি বা $\gamma$-রশ্মি সাধারণতঃ আয়ন উৎপন্ন করে না। তবে তারা বিভিন্ন পদ্ধতিতে পরমাণু থেকে ইলেকট্রন উচ্ছিন্ন করে। এইসব ইলেকট্রন গ্যাসের মধ্যে আয়ন উৎপন্ন করে এবং এদের ভ্রমণপথ মেঘ-কক্ষের মধ্যে দৃশ্যমান হয়। এদের সাধারণতঃ $\delta$-রশ্মি বলা হয়। এরা যে সব বিন্দু থেকে উৎপন্ন হয় সেগুলি সংযুক্ত করলে X বা $\gamma$-রশ্মির ভ্রমণপথ নির্ণয় করা যায়।

উইলসন মেঘ-কক্ষটি যদি চৌম্বক ক্ষেত্রের মধ্যে রাখা থাকে, তাহলে এর মধ্য দিয়ে বিচরণশীল আহিত কণিকার ভ্রমণপথ তাড়িৎচুম্বকীয় সূত্র অনুযায়ী বক্র হয়ে যায়। এইরূপ ভ্রমণপথের আলোকচিত্র গ্রহণ করে এর বক্রতা পরিমাণ করা যায়। এই বক্রতা এবং মেঘ-কক্ষের গ্যাসের মধ্যে কণিকাটি কর্তৃক উৎপন্ন আয়নন হার পরিমাপ করে কণিকাটির ভরবেগ এবং প্রকৃতি সম্বন্ধে গুরুত্বপূর্ণ তথ্য জানা যায়। মহাজাগতিক রশ্মির (Cosmic Rays) মধ্যে বর্তমান অতি উচ্চ শক্তি সম্পন্ন বিভিন্ন প্রকার আহিত কণিকা, যথা ইলেকট্রন, পজিট্রন, মেসন, প্রভৃতি সম্পর্কিত অনেক গুরুত্বপূর্ণ তথ্য মেঘ-কক্ষের সাহায্যে সংগৃহীত হয়েছে। বৃটিশ বিজ্ঞানী ব্ল্যাকেট (P.M.S. Blackett) গাইগার-মূলার সংখ্যায়ক দ্বারা মেঘ-কক্ষের প্রসারণ নিয়ন্ত্রিত করে এর সাহায্যে মহাজাগতিক রশ্মি নিরীক্ষণ করার পদ্ধতির যথেষ্ট উন্নতি বিধান করেন। এ সম্বন্ধে (20·5) অনুচ্ছেদে আলোচনা করা হবে।

সাম্প্রতিককালে ব্যাপন মেঘ-কক্ষ (Diffusion Cloud Chamber) নামক আর একপ্রকার সরলতর মেঘ-কক্ষ উদ্ভাবিত হয়েছে। এই যন্ত্রে একটি কাঁচের জারের মধ্যে অল্প পরিমাণে কোন উদ্বায়ী (Volatile) তরল রাখা থাকে। জারটিকে এক খণ্ড কঠিন কার্বন-ডাইঅক্সাইডের উপরে স্থাপিত করা হয়, যার ফলে জারের মধ্যে নীচের থেকে উপরের দিকে উষ্ণতার সমধিক পার্থক্য উৎপন্ন হয়। উপরের অপেক্ষাকৃত উষ্ণতর বাষ্প ব্যাপনের ফলে যত নীচের দিকে অবতরণ করে, ততই বাষ্প শীতলতর হতে থাকে এবং অবশেষে অতিপৃক্ত হয়। এই অতিপৃক্ত অঞ্চলের মধ্য দিয়ে যখন কোন উচ্চ-শক্তি আহিত কণিকা বিচরণ করে, তখন তাদের ভ্রমণপথ পূর্ববর্ণিত পদ্ধতিতে দৃশ্যমান হয়ে যায়। ব্যাপন মেঘ-কক্ষ সূক্ষ্ম পরিমাপের পক্ষে বিশেষ উপযোগী নয়। তবে সহজ উপায়ে উচ্চশক্তি আহিত কণিকার ভ্রমণপথ প্রদর্শনের পক্ষে এটি বিশেষ উপযোগী।

## 15.3 : গাইগার-মুলার সংখ্যায়ক

(12·3) অনুচ্ছেদে এই যন্ত্র সম্বন্ধে সংক্ষিপ্ত আলোচনা করা হয়েছে। (15·3) চিত্রে এই যন্ত্রের অধুনা প্রচলিত সংস্করণের নিদর্শন দেখান হয়েছে।

চিত্র 15·3

গাইগার-মূলার সংখ্যায়ক।

B হচ্ছে প্রায় 5 সেমি ব্যাস সম্পন্ন একটি আবদ্ধ কাঁচনল, যার মধ্যে একটি বেলনাকৃতি তামার তৈয়ারী ক্যাথোড C অবস্থিত থাকে। ক্যাথোডের অক্ষ বরাবর একটি সরু ( প্রায় ·01 সেমি ব্যাস সম্পন্ন ) টাংষ্টেন তার A টান করে লাগান থাকে। এই তারটি অ্যানোডের কাজ করে। C এবং A তড়িৎদ্বার দুটির মধ্যে কাঁচের ভিতর দিয়ে সীল করা দুটি তারের সাহায্যে বাইরে থেকে বিভব প্রভেদ প্রয়োগ করার ব্যবস্থা থাকে। কাঁচনলের অভ্যন্তরস্থ বায়ু পাম্পের সাহায্যে নিষ্কাশিত করে সেটিকে 10 সেমি চাপে আর্গন গ্যাস দ্বারা পূর্ণ করা হয়। আর্গন গ্যাসের সংগে অল্প পরিমাণে কোন উদ্বায়ী তরলের বাষ্প ( যথা ইথাইল-কোহল ) মিশ্রিত থাকে। এই বাষ্পের আংশিক চাপ প্রায় এক সেমি রাখা হয়। C এবং A তড়িৎদ্বার দুটির মধ্যে প্রায় 1000 ভোল্ট বিভব প্রভেদ প্রয়োগ করা হয়।

সংখ্যায়কের মধ্যে অ্যানোডের ব্যাস খুব কম হওয়ার জন্য 1000 ভোল্ট বিভব প্রভেদে নিম্নচাপ সম্পন্ন গ্যাসের মধ্যে অ্যানোড থেকে তড়িৎ মোক্ষণ ( করোনা-মোক্ষণ ) হতে থাকে। যখন কোন উচ্চশক্তি সম্পন্ন আয়ন-উৎপাদক বিকিরণ গ্যাসের মধ্য দিয়ে ভ্রমণ করে, তখন এই মোক্ষণ আরও সহজে ঘটে। অ্যানোডের খুব সন্নিকটে তড়িৎক্ষেত্র প্রাবল্যের মান অতি উচ্চ হয়। ফলে এই অঞ্চলে উৎপন্ন আয়নগুলি সংঘাতের দ্বারা নূতন করে আরও অধিক সংখ্যক আয়ন উৎপন্ন করে। এই ধরনের নূতন আয়ন উৎপাদন হয় প্রধানতঃ ইলেকট্রনগুলির দ্বারা। সংঘাতের দ্বারা নূতন আয়নন উৎপাদনের ফলে অতি অল্প সময়ের মধ্যে ($10^{-6}$ সেকেণ্ডের মধ্যে ) বিপুল সংখ্যক ঋণাত্মক আয়ন, অর্থাৎ যেন একটা আয়ন-সম্প্রপাত (Avalanche of

Ions) সমগ্র অ্যানোড তারটির কাছাকাছি সৃষ্ট হয় এবং এই তার বরাবর করোনা মোক্ষণ হতে থাকে। অ্যানোডের উপরে আপতিত আয়ন-সম্প্রপাতের মধ্যে প্রায় $10^{10}$ সংখ্যক আয়ন থাকে এবং এই সংখ্যা অনুপ্রবিষ্ট বিকিরণের প্রকৃতির উপরে নির্ভর করে না। সেইজন্য গাইগার-মূলার সংখ্যায়কের সাহায্যে বিভিন্ন প্রকার বিকিরণের ( অর্থাৎ $\alpha$, $\beta$ বা $\gamma$ বিকিরণের ) পার্থক্য বোঝা সম্ভব হয় না। সংখ্যায়কের মধ্যে উৎপন্ন আয়ন সংখ্যার এই বৃদ্ধিকে বলা হয় গ্যাস-পরিবর্ধন (Gas Amplification)।

অল্পক্ষণের মধ্যে বিপুল সংখ্যক ইলেকট্রন আপতিত হওয়ার জন্য অ্যানোডে যে আধান সংগৃহীত হয় তার ফলে এর বিভবের একটা ক্ষণস্থায়ী পরিবর্তন উৎপন্ন হয়। এর পরে যখন সমস্ত উৎপন্ন ধনাত্মক আয়নগুলি C ক্যাথোডে এসে উপস্থিত হয়, তখন অ্যানোডটি আবার পূর্ব বিভবে ফিরে আসে। ধনাত্মক আয়নগুলি অপেক্ষাকৃত গুরুভার হওরার জন্য অ্যানোড থেকে ক্যাথোডে পৌঁছতে এদের প্রায় $10^{-4}$ সেকেণ্ড সময় লাগে। ফলে সংখ্যায়কটি একটি আয়ন উৎপাদক কণিকা নির্দেশ করার পরে প্রায় $10^{-4}$ সেকেণ্ড সময় পর্য্যন্ত কর্মক্ষমতাহীন হয়ে থাকে। এর পরে সংখ্যায়কটি আবার নূতন আর একটি বিকিরণের প্রবেশ নির্দেশ করার মত অবস্থায় ফিরে আসে।

অ্যানোডে যে ক্ষণস্থায়ী বিভব পরিবর্তন বা বিভব-ঝলক (Voltage Pulse) সৃষ্ট হয় তা সাধারণ বৈদ্যুতিক সংকেতের (Signal) মত ইলেকট্রনিক বর্তনীর (Electronic Circuit ) সাহায্যে পরিবর্ধিত (Amplify) করে অভিলিখিত (Record) করা যায়।

এখানে উল্লেখযোগ্য যে যেহেতু ধনাত্মক আয়নগুলি অপেক্ষাকৃত মন্থর-গতিতে C ক্যাথোডের দিকে অগ্রসর হয়, সেগুলি অ্যানোডকে বেষ্টন করে কিছুক্ষণের জন্য একটা স্থান-আধানের বেষ্টনী (Space Charge Sheath) সৃষ্টি করে। এর ফলে অ্যানোডে উৎপন্ন করোনা-মোক্ষণ খুব তাড়াতাড়ি ($10^{-6}$ সেকেণ্ডের মধ্যে ) স্তব্ধ হয়ে যায়। এর প্রায় $10^{-4}$ সেকেণ্ড পরে ধনাত্মক আয়নগুলি যখন ক্যাথোডের কাছে উপস্থিত হয়, তখন সেগুলি ক্যাথোড তল থেকে ইলেকট্রন আকর্ষণ করে। এই ইলেকট্রনগুলি ধনাত্মক আয়নে সংবদ্ধ হয়ে সেগুলিকে আধানহীন পরমাণুতে রূপান্তরিত করে। ইলেকট্রনগুলি প্রথমে পরমাণুর বহিস্থ কক্ষপথে সংবদ্ধ হয়, পরে ভিতরের কক্ষ পথে সংক্রমিত হয়। এর ফলে পরমাণুগুলি থেকে অতিবেগনী রশ্মি নিঃসৃত

হয় এবং এই রশ্মি ক্যাথোড তলের উপরে আপতিত হয়ে ফোটো ইলেকট্রন নিঃসৃত করে। এইভাবে উচ্ছিন্ন ইলেকট্রনগুলি অ্যানোডের দিকে যাবার সময়ে আবার সংঘাতের দ্বারা বিপুল সংখ্যক আয়ন উৎপন্ন করে, যার ফলে অ্যানোডের কাছে আবার একটি আয়ন-সম্প্রপাত সৃষ্ট হতে পারে। এইরূপ সংঘটনের যদি পুনরাবৃত্তি হতে থাকে তাহলে সংখ্যায়কটির মধ্যে একটি মাত্র অনুপ্রবিষ্ট বিকিরণের প্রভাবে বারংবার মোক্ষণ সৃষ্ট হতে থাকবে। এইরূপ সংঘটন বন্ধ করার জন্য সংখ্যায়ক মধ্যস্থ উদাসী আর্গন গ্যাসের সংগে অল্প পরিমাণে কোন বহু পরমাণুক (Polyatomic) উদ্বায়ী তরলের (যথা ইথাইল-কোহল) বাষ্প মিশ্রিত থাকে। এই বাষ্পকে বলা হয় 'নিবারক-বাষ্প' (Quenching Vapour)। এইরূপ বাষ্পের উপস্থিতির ফলে নিম্নে আলোচিত পদ্ধতিতে মোক্ষণের পুনরাবৃত্তি নিবারিত (Quenched) হয়।

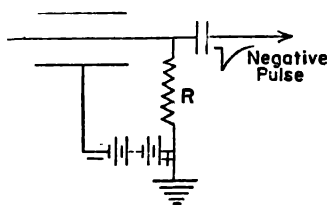
মনে করা যাক যে একটি সংখ্যায়ক 90% আর্গন গ্যাস এবং 10% ইথাইল-কোহল বাষ্প দ্বারা মোট 10 সেমি (Hg) চাপে পূর্ণ করা আছে। পূর্বে আলোচিত আয়ন সম্প্রপাতের মধ্যে এই দুই প্রকার গ্যাসের আয়নই উপস্থিত থাকে। আর্গন ও ইথাইল-কোহল আয়নগুলির আয়নন বিভব হচ্ছে যথাক্রমে 15·7 ই-ভো এবং 11·3 ই-ভো। অ্যানোড থেকে ক্যাথোডের দিকে যাবার পথে আয়নগুলি আর্গন ও কোহলের আধানহীন অণুসমূহের সংগে বারবার সংঘাত প্রাপ্ত হয়। আর্গন আয়নগুলি সংঘাতের ফলে কোহল অণু থেকে ইলেকট্রন সংগ্রহ করে আধানহীন পরমাণুতে রূপান্তরিত হতে পারে। কারণ এর ফলে যে শক্তি উদ্ভূত হয় (15·7 ই-ভো), তা কোহল অণুকে আয়নিত করার পক্ষে যথেষ্ট হয়। এইরূপ সংঘাতের ফলে কোহল অণু আয়নিত হয়। কিন্তু এর বিপরীত প্রক্রিয়া, অর্থাৎ কোহল আয়ন ও আর্গন পরমাণুর মধ্যে সংঘাতের ফলে আধানহীন কোহল অণু এবং আর্গন আয়ন উৎপন্ন হতে হতে পারে না। কারণ এক্ষেত্রে শক্তি সংরক্ষিত হয় না। অ্যানোড ও ক্যাথোডের মধ্যে বারবার সংঘাতের ফলে প্রায় সমস্ত আর্গন আয়ন আধানহীন পরমাণুতে রূপান্তরিত হয় এবং ক্যাথোডে আগত আয়নগুলি প্রায় সবই কোহল আয়ন হয়। এই কোহল আয়নগুলিও পূর্বোল্লিখিত পদ্ধতিতে ক্যাথোড থেকে ইলেকট্রন সংগ্রহ করে আধানহীন হয়। কিন্তু এক্ষেত্রে অতিবেগনী রশ্মি নিঃসরণের পরিবর্তে ইলেকট্রন সংবন্ধনের সময়ে কোহল অণুগুলি বিশ্লিষ্ট (Dissociated) হয়ে যায়। ফলে ক্যাথোড থেকে নূতন করে কোন ইলেকট্রন উচ্ছিন্ন হয়ে মোক্ষণের পুনরাবৃত্তি ঘটাতে পারে না।

এখানে উল্লেখযোগ্য যে কোহল অণুর সংগে সংঘাতের ফলে আর্গন আয়নগুলি যখন আধানহীন হয়ে যায়, তখন যে (15·7 – 11·3) বা 4·4 ই-ভো শক্তি উদ্বৃত্ত হয়, তা অতিবেগনী রশ্মি হিসাবে নিঃসৃত হয়। কিন্তু এই রশ্মি কোহল বাষ্প দ্বারা সহজেই শোষিত হয়, ক্যাথোড থেকে ইলেকট্রন উচ্ছিন্ন করে নূতন মোক্ষণ সৃষ্টি করতে পারে না।

উপরের আলোচনা থেকে দেখা যায় যে নিবারক বাষ্পের নিম্নলিখিত বৈশিষ্ট্যগুলি থাকা প্রয়োজনঃ (ক) এর আয়নন বিভব সংখ্যায়কের প্রধান গ্যাসের (যথা আর্গনের) আয়নন বিভব অপেক্ষা কম হওয়া প্রয়োজন; (খ) এর অণুগুলির সহজেই বিশ্লিষ্ট হবার প্রবণতা থাকা প্রয়োজন; (গ) এই বাষ্পের অতিবেগনী রশ্মি শোষণ ক্ষমতা উচ্চ হওয়া প্রয়োজন।

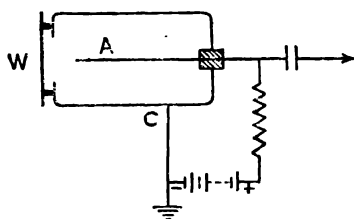
নিবারক বাষ্পের অণুগুলি বিশ্লিষ্ট হওয়ার জন্য দীর্ঘদিন ব্যবহারের পরে এর নিবারক ক্ষমতা বিনষ্ট হয় এবং সংখ্যায়কটি নিষ্ক্রিয় হয়ে যায়। অনেক সময়ে ক্লোরিন, ব্রোমিন প্রকৃতি হ্যালোজেন গ্যাস নিবারক হিসাবে ব্যবহার করা হয়। আর্গন-নীয়ন মিশ্রণ বা নীয়নের সংগে খুব অল্প পরিমাণে (0·1%) এইরূপ নিবারক গ্যাস ব্যবহার করা হয়। বিশ্লিষ্ট হবার পরে এই সব গ্যাসের পরমাণুগুলি পুনর্সংযোজিত হয়ে আদি অণুতে রূপান্তরিত হয়। ফলে এই জাতীয় নিবারক গ্যাস বিনষ্ট হয় না এবং এইরূপ সংখ্যায়ক প্রায় অনন্তকাল ধরে ক্রিয়াশীল থাকে।

উপরে আলোচিত সংখ্যায়কগুলিকে 'স্বতঃ-নিবারক' (Self Quenching) সংখ্যায়ক বলে। এ ছাড়া খুব উচ্চ রোধ ($10^9$ ওহ্‌ম) ব্যবহার করে বা ইলেকট্রনিক পদ্ধতিতে মোক্ষণের পুনরাবৃত্তি নিবারণ করা যায়। স্বতঃ-নিবারক সংখ্যায়কের ব্যবহারই অধিক প্রচলিত।

সাধারণতঃ গাইগার-মূলার সংখ্যায়কের অ্যানোড তারটি একটি উচ্চ

চিত্র 15·4

গাইগার-মূলার সংখ্যায়ক কর্তৃক বিভব-ঝলক উৎপাদনের ক্রিয়াবিধি।

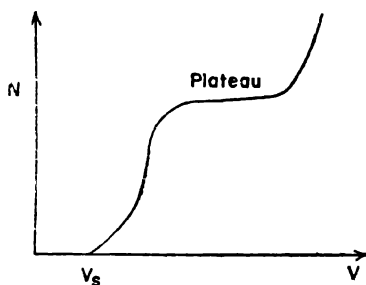
রোধের ($R \sim 10^6$ ওহ্‌ম) মধ্য দিয়ে বিভব উৎসের সংগে সংযুক্ত থাকে। ফলে মোক্ষণ জনিত ক্ষণস্থায়ী তড়িৎপ্রবাহ $I$ উক্ত রোধের ভিতর দিয়ে প্রবাহিত হয়ে অ্যানোড বিভবের মান $IR$ পরিমাণে কমিয়ে দেয়। (15·4) চিত্রে ক্ষণস্থায়ী তড়িৎ ঝলক (Electrical Pulse) উৎপাদনের এই ব্যবস্থা প্রদর্শিত হয়েছে।

এখানে উল্লেখযোগ্য যে উপরে আলোচিত গাইগার-মূলার সংখ্যায়কের কাঁচগাত্র ভেদ করে সাধারণতঃ $\gamma$-রশ্মি, $\mu$-মেসন প্রভৃতি উচ্চ ভেদ্যতা সম্পন্ন বিকিরণ এর মধ্যে প্রবেশ করতে পারে। কিন্তু $\alpha$ বা $\beta$ কণিকার ভেদ্যতা কম হওয়ার জন্য এইসব বিকিরণ নির্দেশের জন্য সংখ্যায়কয়টির গঠন কিছুটা অন্য ধরনের করা প্রয়োজন হয়। এইরূপ একটি সংখ্যায়ক (15·5) চিত্রে প্রদর্শিত

চিত্র 15·5

অল্প ভেদ্যতা সম্পন্ন বিকিরণ ( $\alpha$ বা $\beta$ ) নির্দেশের জন্য ব্যবহৃত গাইগার-মূলার সংখ্যায়কের নিদর্শন।

হয়েছে। এক্ষেত্রে সংখ্যায়কের ধাতু নির্মিত C ক্যাথোডটিই এর বহিরাবরণের কাজ করে। এর থেকে অন্তরিত অবস্থায় একটি অক্ষীয় টাংষ্টেন নির্মিত সূক্ষ্ম অ্যানোড দণ্ড A সংখ্যায়কের মধ্যে স্থাপিত থাকে। অ্যানোড দণ্ডের এক প্রান্ত সাধারণতঃ সূচল হয় এবং এই প্রান্তের সন্নিকটে তড়িৎক্ষেত্র প্রাবল্য খুব উচ্চ হওয়ার জন্য আয়ন-সম্প্রপাত (Avalanche of Ions) এর খুব কাছাকাছি সৃষ্ট হয়। ভূমি-সংযুক্ত বেলনাকৃতি ক্যাথোডের এক প্রান্ত উন্মুক্ত থাকে। এই উন্মুক্ত প্রান্ত বা জানালা W একটি খুব পাতলা অভ্রের চাদর দ্বারা আচ্ছাদিত থাকে। $\alpha$ বা $\beta$ কণিকাগুলি এই চাদর ভেদ করে W জানালার মধ্যে দিয়ে সংখ্যায়কের মধ্যে প্রবেশ করে।

সাধারণতঃ গাইগার-মূলার সংখ্যায়ক একটা নির্দিষ্ট ন্যূনতম বিভব $V_s$

অপেক্ষা উচ্চতর বিভবে ক্রিয়াশীল হয়। সংখ্যায়ক বিভব $V$ যদি এই সূচনা-বিভবের (Threshold Potential) উপরে ক্রমশঃ বৃদ্ধি করা যায়, তাহলে

চিত্র 15·6

সংখ্যায়ক-বিশেষত্ব।

কণিকা গণনার হার (Counting Rate) $N$ প্রথমে দ্রুত বৃদ্ধি পায় এবং পরে ধ্রুবক হয়ে যায়। যে বিভব অঞ্চলে কণিকা গণনার হার ধ্রুবক হয়, তাকে বলা হয় মালভূমি অঞ্চল (Plateau)। সাধারণতঃ সংখ্যায়কটির বিভব মালভূমি অঞ্চলের মাঝামাঝি রেখে কাজ করা হয়। বিভব খুব উচ্চ হলে সংখ্যায়কের মধ্যে স্ফুলিংগ (Spark) সৃষ্ট হয়, যার ফলে গণনার হার আবার খুব দ্রুত বৃদ্ধি পায়। (15·6) চিত্রে বিভবের সংগে গাইগার-মূলার সংখ্যায়ক দ্বারা কণিকা গণনা হার পরিবর্তনের লেখচিত্রের নিদর্শন দেখান হয়েছে। এইরূপ লেখচিত্রকে বলা হয় 'সংখ্যায়ক বৈশিষ্ট্য' (Counter Characteristic)।

## 15.4 : আনুপাতিক সংখ্যায়ক এবং আয়নন-কক্ষ

আমরা দেখেছি যে গাইগার-মূলার সংখ্যায়কের বিভব যদি মালভূমি (Plateau) অঞ্চলে থাকে তাহলে সংখ্যায়কের মধ্যে সমগ্র অ্যানোড তার জুড়ে আয়ন-সম্প্রপাত (Avalanche) সৃষ্ট হয়। যদি সংখ্যায়ক বিভবের মান সূচনা বিভব (Threshold Potential) এবং মালভূমির প্রারম্ভিক বিভবের মধ্যে থাকে তাহলেও সংখ্যায়ক গ্যাসের মধ্যে আয়ন সম্প্রপাত উৎপন্ন হয়। কিন্তু এক্ষেত্রে উৎপন্ন আয়ন সম্প্রপাত অনুপ্রবিষ্ট বিকিরণের দ্বারা উৎপন্ন প্রাথমিক আয়নগুলির খুব কাছে সন্নিবদ্ধ থাকে। গাইগার-মূলার সংখ্যায়কের মত সমগ্র অ্যানোড তারটি ঘিরে বিস্তৃত হয় না।

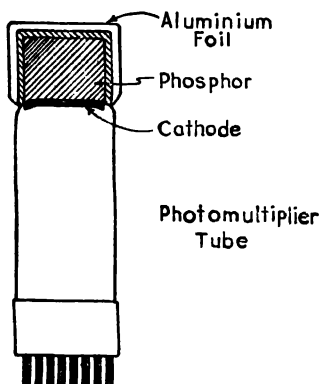
আয়ন সম্প্রপাতের মধ্যে বর্তমান আয়ন সংখ্যা অনুপ্রবিষ্ট বিকিরণের দ্বারা উৎপন্ন প্রাথমিক আয়ন সংখ্যার সমানুপাতিক হয়। অর্থাৎ এই সংখ্যা নির্ভর করে অনুপ্রবিষ্ট বিকিরণের প্রকৃতির উপরে। $\alpha$-কণিকার ক্ষেত্রে এই সংখ্যা যত উচ্চ হয়, $\beta$-কণিকার ক্ষেত্রে তার শত ভাগ বা আরও কম হয়। ফলে অ্যানোডে উৎপন্ন তড়িৎ ঝলকের বিস্তার (Amplitude) বিকিরণের প্রকৃতির উপরে নির্ভরশীল হয়। সুতরাং এইভাবে ক্রিয়াশীল সংখ্যায়কের সাহায্যে $\alpha$, $\beta$ প্রভৃতি বিকিরণের পার্থক্য নির্দেশিত হয়। এইভাবে ক্রিয়াশীল সংখ্যায়ককে 'আনুপাতিক-সংখ্যায়ক' (Proportional Counter) বলা হয়।

X-রশ্মির নির্দেশক হিসাবে ব্যবহৃত আয়নন কক্ষ সম্বন্ধে ইতিপূর্বে উল্লেখ করা হয়েছে (6·12 অনুচ্ছেদ দ্রষ্টব্য)। $\alpha$, $\beta$ বা $\gamma$-রশ্মি ছাড়া অন্যান্য প্রকার বিকিরণ, বিশেষতঃ নিউট্রন নির্দেশের জন্য এই যন্ত্রটি ব্যবহার করা হয়। আয়নন কক্ষের মধ্যে প্রয়োজনমত বিভিন্ন প্রকার গ্যাস ব্যবহার করা হয়। $\gamma$-রশ্মি নির্দেশের জন্য কোন ভারী গ্যাস, যথা ফ্রিয়ন ($CCl_2F_2$) ব্যবহার করা হয়। অ্যানোড ও ক্যাথোডের মধ্যে কয়েক শত ভোল্ট পর্যন্ত বিভব প্রভেদ প্রয়োগ করা হয়।

গাইগার-মূলার সংখ্যায়কের সংগে আয়নন কক্ষের প্রধান পার্থক্য হচ্ছে যে আয়নন কক্ষের মধ্যে তড়িৎক্ষেত্র প্রথমোক্ত সংখ্যায়ক অপেক্ষা অনেক কম হয়। ফলে সাধারণতঃ আয়নন কক্ষের মধ্যে সংঘাতের দ্বারা নূতন আয়ন সৃষ্টি হয় না। অনুপ্রবিষ্ট বিকিরণ কর্তৃক উৎপন্ন প্রাথমিক আয়নগুলিই তড়িৎদ্বার দুটির দ্বারা সংগৃহীত হয়। সেজন্য আয়নন কক্ষের সাহায্যে বিভিন্ন প্রকার বিকিরণের পার্থক্য বোঝা যায়। কক্ষের মধ্যে যে আয়নন-প্রবাহ সৃষ্ট হয় তা ইলেকট্রমিটার বা অনুরূপ যন্ত্রের সাহায্যে নির্দেশিত করা যায়। সমদিষ্ট পরিবর্ধকের (D. C. Amplifier) সাহায্যে এই প্রবাহ পরিবর্ধিত করে নির্দেশ করা যায়। আয়নন কক্ষ বা আনুপাতিক সংখ্যায়কের সাহায্য নিউট্রন নির্দেশ করা সম্ভব। এ সম্বন্ধে (17·15) অনুচ্ছেদে আলোচনা করা হবে।

## 15.5 : চমক সংখ্যায়ক

আমরা পূর্বে দেখেছি যে রাদারফোর্ড এবং তাঁর সহযোগীগণ ZnS প্রভৃতি প্রতিপ্রভ পদার্থ দ্বারা প্রলিপ্ত পর্দার উপরে $\alpha$-কণিকা আপতিত করে ক্ষণস্থায়ী দীপ্তির চমক দেখতে পান। অণুবীক্ষণ যন্ত্রের সাহায্যে এইভাবে উৎপন্ন দীপ্তির চমক (Scintillation) গণনা করে তাঁরা নানাবিধ গুরুত্বপূর্ণ পরীক্ষা

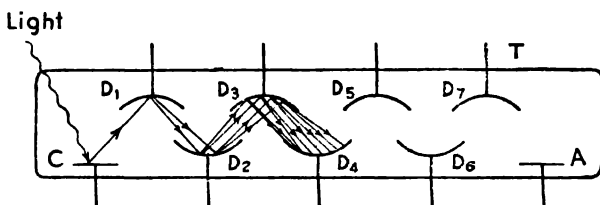
অনুষ্ঠিত করেন। এইসব পরীক্ষায় অণুবীক্ষণের অভিলক্ষ্য (Objective) লেন্সের সংলগ্ন প্রতিপ্রভ পর্দার উপরে উৎপন্ন যেসব দীপ্তির চমক চোখে দেখা যেত, সেগুলি গণনা করা হত। স্পষ্টতঃ এইরূপ গণনা তখনই সম্ভব যখন উক্ত

চিত্র 15·7

চমক সংখ্যায়ক।

পর্দার উপরে $\alpha$-কণিকার আপতন হার খুব মন্থর হয়। খুব দ্রুতহারে আপতিত $\alpha$-কণিকার ক্ষেত্রে শুধু চোখে দেখে দীপ্তির চমকগুলিকে পৃথক পৃথক ভাবে গণনা করা সম্ভব হয় না।

বর্তমান কালে তেজস্ক্রিয় বিকিরণ কর্তৃক উৎপন্ন দীপ্তির চমকগুলিকে ইলেকট্রনিক পদ্ধতিতে নির্দেশ করার এবং এদের সংখ্যা গণনা করার ব্যবস্থা উদ্ভাবিত হয়েছে ( 14·8 অনুচ্ছেদ দ্রষ্টব্য )। এই ব্যবস্থার ফলে খুব দ্রুত হারে আপতিত $\alpha$, $\beta$ প্রভৃতি কণিকার বা $\gamma$-ফোটনের সংখ্যা সহজেই নির্ণয় করা যায়। এই ব্যবস্থাকে 'চমক সংখ্যায়ক' (Scintillation Counter) নামে অভিহিত করা হয়। এই পদ্ধতিতে কোন প্রতিপ্রভ পদার্থ বা ফসফর (Phosphor) একটি আলোক-তাড়িত পরিবর্ধক (Photo Multiplier) কোষের ফোটো ক্যাথোডের সংগে সংলগ্ন করে স্থাপিত থাকে ( 15·7 চিত্র দ্রষ্টব্য )। প্রতিপ্রভ পদার্থ এবং আলোক-তাড়িত পরিবর্ধক কোষের এই সমন্বয়কে একটি আলোক-অপ্রবেশ্য আবেষ্টনী দ্বারা আচ্ছাদিত করে রাখা হয়। প্রতিপ্রভ পদার্থের মধ্যে অনুপ্রবিষ্ট

তেজস্ক্রিয় বিকিরণ যে দীপ্তির চমক উৎপন্ন করে তা কোষের ফোটো ক্যাথোডের উপরে আপতিত হয়ে ইলেকট্রন নিঃসৃত করে।

(15·8) চিত্রে একটি আলোক-তাড়িত পরিবর্ধক কোষের সরল নকশা প্রদর্শিত হয়েছে। T একটি কাঁচ বা স্ফটিক (Quartz) নির্মিত খুব নিম্ন বায়ুচাপ সম্পন্ন আবদ্ধ নল, যার এক প্রান্তে ভিতরের গাত্রে আলোক-সুবেদী কোন পদার্থ প্রলিপ্ত থাকে। এই পদার্থটি ফোটো ক্যাথোডের কাজ

চিত্র 15·8

আলোক-তাড়িত পরিবর্ধক কোষের ক্রিয়াবিধি। সমগ্র কোষটিকে ঘিরে একটি নরম লোহার বেষ্টনী থাকে, যা চিত্রে দেখান হয়নি। এর ফলে ডাইনোড নিঃসৃত ইলেকট্রনগুলির গতিপথ বহিস্থ কোন চৌম্বক ক্ষেত্র দ্বারা প্রভাবিত হতে পারেনা।

করে। (15·8) চিত্রে পৃথকভাবে দেখান C ক্যাথোডের সামনের দিকে আরও কয়েকটি আলোক-সুবেদী ধাতব তড়িৎদ্বার ($D_1$, $D_2$,······ইত্যাদি ) থাকে। এগুলিকে বলা হয় ডাইনোড (Dynodes)। এই ডাইনোডগুলির অপর প্রান্তে একটি অ্যানোড (A) স্থাপিত থাকে। ক্যাথোড C এবং এর নিকটতম $D_1$ প্রথম ডাইনোডের মধ্যে 80 থেকে 100 ভোল্টের মত বিভব প্রভেদ প্রয়োগ করা হয়। পরপর স্থাপিত ডাইনোডগুলির মধ্যে এবং সর্বশেষ ডাইনোড ও অ্যানোডের মধ্যেও সমপরিমাণ বিভব প্রভেদ প্রয়োগ করা হয়।

আপতিত আলোকের ক্রিয়ায় ফোটো ক্যাথোড C থেকে যেসব ইলেকট্রন নির্গত হয়, সেগুলি প্রযুক্ত বিভব প্রভেদের প্রভাবে আকৃষ্ট হয়ে $D_1$ প্রথম ডাইনোডের উপরে আপতিত হয়। এদের প্রত্যেকটি আবার $D_1$ ডাইনোডের আলোক-সুবেদী তল থেকে একাধিক ইলেকট্রন নিঃসৃত করে। এই সংখ্যা $N$ ধরা যাক। $D_1$ থেকে নিঃসৃত ইলেকট্রনগুলি বিভব প্রভেদের প্রভাবে আকৃষ্ট হয়ে $D_2$ দ্বিতীয় ডাইনোডের উপরে আপতিত হয়। এদের

প্রত্যেকটি আবার $D_2$ থেকে $N$ সংখ্যক ইলেকট্রন নিঃসৃত করে ; সুতরাং $D_2$ থেকে মোট $N^2$ সংখ্যক ইলেকট্রন নিঃসৃত হয়। এইসব ইলেকট্রন আবার তৃতীয় ডাইনোড ($D_3$) কর্তৃক আকৃষ্ট হয়। এর উপরে আপতিত হয়ে এদের প্রত্যেকটি আবার $N$ সংখ্যক ইলেকট্রন নিঃসৃত করে, যার ফলে $D_3$ থেকে মোট $N^3$ সংখ্যক ইলেকট্রন নির্গত হয়। এইভাবে পরপর স্থাপিত ডাইনোডগুলি থেকে ক্রম-বর্ধমান সংখ্যক ইলেকট্রন নির্গত হতে থাকে। যদি মোট ডাইনোড সংখ্যা হয় $n$, তাহলে পরিশেষে অ্যানোডের উপরে $N^n$ সংখ্যক ইলেকট্রন আপতিত হয়। সাধারণতঃ ডাইনোড সংখ্যা দশ থেকে ষোল পর্যন্ত হয়। উদাহরণস্বরূপ যদি ডাইনোড সংখ্যা $n=10$ হয় এবং $N=4$ হয়, তাহলে অ্যানোডে আপতিত মোট ইলেকট্রন সংখ্যা হয়

$$N^n = 4^{10} \simeq 10^6$$

অর্থাৎ ফোটো ক্যাথোড C থেকে নিঃসৃত একটি মাত্র ইলেকট্রনের প্রভাবে অ্যানোডে $10^6$ সংখ্যক ইলেকট্রন আপতিত হয়। সুতরাং এই ব্যবস্থার সাহায্যে আলোক-তাড়িত প্রবাহ দশ লক্ষগুণ পরিবর্ধিত হয়। বর্তমান কালে কোন কোন আলোক-তাড়িত পরিবর্ধক কোষের সাহায্যে $10^9$ গুণ পর্য্যন্ত পরিবর্ধন (Multiplication) সম্ভব হয়।

A অ্যানোডের সংগে একটি উচ্চ রোধ ($R \simeq 10^6$ ওহ্‌ম ) সংযুক্ত থাকে। অ্যানোডে সংগৃহীত ইলেকট্রনগুলি এই রোধের মধ্য দিয়ে প্রবাহিত হয়ে যে ক্ষণস্থায়ী তড়িৎপ্রবাহ $I$ সৃষ্টি করে, তার ফলে অ্যানোডে $IR$ পরিমাণ ক্ষণস্থায়ী বিভব পরিবর্তন ঘটে। এই তড়িৎ ঝলক (Pulse) ইলেকট্রনিক পদ্ধতিতে পরিবর্ধিত (Amplify) করে অভিলিখিত (Record) করার ব্যবস্থা করা হয়। এইভাবে ফোটো ক্যাথোডে উৎপন্ন প্রত্যেকটি দীপ্তির চমক (Scintillation) সহজেই নির্দেশ করা যায় এবং এদের সংখ্যা গণনা করা যায়। এই পদ্ধতিতে গাইগার-মূলার সংখ্যায়কের তুলনায় অনেক বেশী দ্রুত হারে আপতিত তেজস্ক্রিয় বিকিরণের সংখ্যা নির্ণয় করা সম্ভব। পরিবর্ধক কোষ থেকে যে তড়িৎ ঝলক পাওয়া যায় তা সাধারণতঃ $10^{-8}$ সেকেণ্ড কাল মাত্র স্থায়ী হয়।

প্রতিপ্রভ পদার্থ বা ফসফরের মধ্যে তেজস্ক্রিয় বিকিরণ সমূহ কীভাবে দীপ্তির চমক (Scintillation) উৎপন্ন করে তা নিম্নলিখিত উপায়ে বোঝা যায়। $\alpha$, $\beta$ বা অন্যান্য উচ্চশক্তি সম্পন্ন আহিত কণিকা ফসফরের মধ্য দিয়ে ভ্রমণকালে এর অণুগুলিকে আয়নিত অথবা উত্তেজিত করে শক্তিক্ষয়

করে। উত্তেজিত অণুগুলি $10^{-8}$ সেকেণ্ডের মধ্যে নিম্নতর শক্তিস্তরে সংক্রমিত হওয়ার ফলে দৃশ্যমান বা অতিবেগনী আলোক নিঃসৃত হয়। ফসফরের মধ্যে $\gamma$-রশ্মি আলোক-তাড়িত, কম্পটন বিক্ষেপ বা যুগল-উৎপাদন প্রক্রিয়ার দ্বারা উচ্চশক্তি ইলেকট্রন নিঃসৃত করে। এই ইলেকট্রনগুলিও উপরে বর্ণিত পদ্ধতিতে শক্তিক্ষয় করে ফসফরের অণুগুলিকে উত্তেজিত করে, যার ফলে সেগুলি থেকে আলোক নিঃসৃত হয়। তেজস্ক্রিয় বিকিরণের শক্তি সাধারণতঃ কয়েক মিলিয়ন ($10^6$) ইলেকট্রন ভোল্ট হয়। অপরপক্ষে একটি ফসফর অণুর উত্তেজনা শক্তি (Excitation Energy) মাত্র কয়েক ইলেকট্রন ভোল্ট হয়। সুতরাং প্রতিটি আপতিত $\alpha$, $\beta$ ইত্যাদি কণিকা ফসফরের মধ্যে কয়েক লক্ষ দৃশ্যমান বা অতিবেগনী ফোটন অতি অল্প সময়ের ( $10^{-7}$ বা $10^{-8}$ সেকেণ্ডের ) মধ্যে সৃষ্টি করে। এইভাবে সৃষ্ট ক্ষণস্থায়ী আলোর ঝলকই ফোটো ক্যাথোডের উপরে আপতিত হয়।

$\alpha$-কণিকার ক্ষেত্রে সাধারণতঃ ZnS বা ন্যাপথালিন ফসফর ব্যবহার করা হয়। $\beta$-কণিকার ক্ষেত্রে অ্যানথ্রাসিন, ষ্টিলবিন জাতীয় জৈব কেলাস ব্যবহার করা হয়। $\gamma$-রশ্মির ক্ষেত্রে ফসফরের আয়তন বড় হওয়ার প্রয়োজন, যাতে $\gamma$-ফোটনটি ফসফরের মধ্যে ইলেকট্রন উচ্ছিন্ন করার সুযোগ পায়। সাধারণতঃ NaI(Tl), অর্থাৎ থ্যালিয়াম-সক্রিয় (Thallium Activated) সোডিয়াম আয়োডাইড কেলাস $\gamma$-রশ্মি নির্দেশক ফসফর হিসাবে ব্যবহৃত হয়। তাছাড়া বর্তমানে নানারূপ প্ল্যাষ্টিক, জৈব তরল ( যথা জাইলিনের মধ্যে দ্রবীভূত টারফিনাইল ) প্রভৃতি ফসফর হিসাবে ব্যবহৃত হয়। গাইগার-মূলার সংখ্যায়কের তুলনায় চমক-সংখ্যায়কের বিকিরণ নির্দেশ ক্ষমতা (Efficiency) অনেক উচ্চতর, বিশেষতঃ $\gamma$-রশ্মির ক্ষেত্রে। গাইগার-মূলার সংখ্যায়ক প্রতি এক সহস্রে একটি বা আরও কম $\gamma$-রশ্মি নির্দেশ করতে পারে। অর্থাৎ এইরূপ সংখ্যয়কের $\gamma$ নির্দেশ-ক্ষমতা মাত্র 0·1% বা আরও কম হয়। কারণ গাইগার-মূলার সংখ্যায়কের গ্যাসে মাত্র কয়েক সেণ্টিমিটার পরিভ্রমণ পথে $\gamma$-রশ্মি কর্তৃক ইলেকট্রন উচ্ছিন্ন করার সম্ভব্যতা খুবই সামান্য। অপর পক্ষে চমক-সংখ্যায়কে ব্যবহৃত কঠিন ফসফরের মধ্যে একটি $\gamma$-ফোটন অনেক বেশী সংখ্যক পরমাণুর মধ্য দিয়ে পরিভ্রমণ করে। সেজন্য এক্ষেত্রে $\gamma$-রশ্মি কর্তৃক ইলেকট্রন উচ্ছিন্ন করার সম্ভাব্যতাও অনেক বেশী হয়। বস্তুতঃ চমক সংখ্যায়কের $\gamma$ নির্দেশ-ক্ষমতা 20% বা আরও বেশী হয়। তাছাড়া চমক সংখ্যায়কের বিশ্লেষণ ক্ষমতা (Resolving Power) যথেষ্ট উচ্চ হয়।

চমক-সংখ্যায়কের সাহায্যে নিউট্রন নির্দেশ করাও সম্ভবপর। এক্ষেত্রে আপতিত নিউট্রনের আঘাতে প্রতিক্ষিপ্ত প্রোটন ফসফরের মধ্যেকার অণুগুলিকে উত্তেজিত করে দীপ্তির চমক উৎপন্ন করে।

চমক সংখ্যায়ক ব্যবহার করে তেজস্ক্রিয় বিকিরণের, বিশেষতঃ $\gamma$-রশ্মির শক্তি নির্ণয় করা যায়। এই উদ্দেশ্যে উদ্ভাবিত যান্ত্রিক ব্যবস্থা চমক বর্ণালীমাপক (Scintillation Spectrometer) সম্বন্ধে (14·8) অনুচ্ছেদে আলোচনা করা হয়েছে।

## 15.6 : ফোটোগ্রাফিক পদ্ধতিতে তেজস্ক্রিয় বিকিরণ নির্দেশ

খুব উচ্চশক্তি সম্পন্ন বিকিরণ মেঘ-কক্ষের গ্যাসের মধ্যে তাদের পথসীমার অতি অল্প অংশই অতিবাহিত করে। ফলে মেঘ-কক্ষের সাহায্যে এদের সমগ্র ভ্রমণপথ নিরীক্ষণ করা সম্ভব হয় না। অপরপক্ষে কোন কঠিন বা তরল পদার্থের অধিকতর ঘনত্বের জন্য এদের মধ্যে উচ্চশক্তি সম্পন্ন বিকিরণের পথসীমা (Range) অনেক কম হয়। সুতরাং এইরূপ কোন বিকিরণ যদি ফোটোগ্রাফিক প্লেটের আলোক-সুবেদী অবদ্রবের (Emulsion) মধ্যে প্রবেশ করে, তাহলে তাদের সমগ্র ভ্রমণপথ উক্ত অবদ্রবের মধ্যে সীমিত থাকতে পারে। যেহেতু ফোটোগ্রাফিক প্লেটের রাসায়নিক পদার্থের সংগে এই সব বিকিরণের বিক্রিয়া করার ক্ষমতা থাকে, অতএব এই পদ্ধতিতে খুব উচ্চশক্তি সম্পন্ন বিকিরণের সমগ্র ভ্রমণপথের আলোকচিত্র পাওয়া সম্ভব।

এই উদ্দেশ্যে বর্তমানে বিশেষ ধরনের উচ্চ সুবেদিতা সম্পন্ন (Sensitive) ফোটোগ্রাফিক অবদ্রব উদ্ভাবিত হয়েছে। সাধারণ ফোটোগ্রাফিক প্লেটে আলোক-সুবেদী পদার্থের ( যথা AgCl, AgBr প্রভৃতির ) অনুপাত অপেক্ষাকৃত কম থাকে। তাছাড়া এইরূপ প্লেটের অবদ্রবের বেধ খুব কম হয়। বিশেষ পদ্ধতিতে নির্মিত কেন্দ্রকীয় অবদ্রব প্লেটের (Nuclear Emulsion Plate) অবদ্রবের মধ্যে আলোক-সুবেদী পদার্থের অনুপাত খুব উচ্চ ( 80% পর্যন্ত ) রাখা হয়। এদের বেধও অনেক বেশী হয়। সাধারণতঃ 50 মাইক্রন (Micron) থেকে 1000 মাইক্রন (1 মিমি) পর্যন্ত বেধ সম্পন্ন অবদ্রব ব্যবহার করা হয়। এই জাতীয় ফোটোগ্রাফিক প্লেটকে উষ্ণতা নিয়ন্ত্রণ করে দীর্ঘ সময় ধরে বিকসিত করতে হয়।

এই পদ্ধতিতে কোন যন্ত্রের বা ইলেকট্রনিক বর্তনীর প্রয়োজন হয় না। সেজন্য এই ব্যবস্থার সাহায্যে বিকিরণের ভ্রমণপথ অপেক্ষাকৃত অনেক সহজে

নিরীক্ষণ করা যায়। প্লেটের মধ্যে যখন কোন বিকিরণ অবদ্রবের উপরি-পৃষ্ঠের প্রায় সমান্তরালে প্রবেশ করে, তখন সেটি এর সুবেদী কণিকাগুলিকে আয়নিত করে। এই আয়নিত কণিকাগুলি বিকিরণের ভ্রমণপথ বরাবর বিন্যস্ত থাকে। প্লেটটিকে বিকসিত (Develop) করলে প্রতিটি আয়নিত আলোক সুবেদী কণিকা কৃষ্ণায়িত (Blackened) হয়। ফলে বিকিরণের ভ্রমণপথ (Track) একটি কৃষ্ণরেখায় রূপান্তরিত হয়। বিশেষ ধরনের উচ্চ ক্ষমতা সম্পন্ন অণুবীক্ষণের সাহায্যে এই রেখাগুলি সহজেই নিরীক্ষণ করা যায়। এদের দৈর্ঘ্য পরিমাপ করে বিকিরণের পথসীমা (Range) পাওয়া যায়। তাছাড়া ভ্রমণপথের দিক পরিবর্তন থেকে বিকিরণের বিক্ষেপও (Scattering) নিরীক্ষণ করা যায়। যেহেতু ভ্রমণপথ নির্দেশক কৃষ্ণরেখাটি বহু সংখ্যক অতিক্ষুদ্র ( প্রায় এক মাইক্রন ব্যাস সম্পন্ন ) আয়নিত কণিকার সমন্বয়ে উৎপন্ন হয়, উচ্চ ক্ষমতা সম্পন্ন অণুবীক্ষণের সাহায্যে নির্দিষ্ট দৈর্ঘ্যের মধ্যে এইরূপ কণিকার সংখ্যা গণনা করে, বিকিরণের আয়নন ক্ষমতাও পরিমাণ করা যায়।

কেন্দ্রকীয় অবদ্রব প্লেটের মধ্যে প্রাকৃতিক তেজস্ক্রিয় পদার্থ নিঃসৃত $\alpha$-কণিকার পথসীমার দৈর্ঘ্য সাধারণতঃ 20 থেকে 50 মাইক্রন পর্যন্ত হয়। $\alpha$-কণিকার ভ্রমণপথ নির্দেশক রেখাগুলি যথেষ্ট স্থূল হয়। $\beta$-কণিকার ভ্রমণপথ নির্দেশক রেখাগুলি খুব ক্ষীণ হয়। সাধারণতঃ মহাজাগতিক রশ্মির (Cosmic Rays) মধ্যে বর্তমান বিভিন্ন প্রকার কণিকা, যথা $\mu$ বা $\pi$ মেসন, অতি উচ্চ শক্তিসম্পন্ন ($E > 10^9$ ই-ভো ) প্রোটন বা অন্যান্য প্রকার কেন্দ্রক এবং নানাবিধ মৌলিক কণিকা (Fundamental Particles) নিরীক্ষণের পক্ষে এই পদ্ধতি বিশেষ সুবিধাজনক। তাছাড়া আধুনিক কণিকা উৎপাদনকারী যন্ত্রসমূহ ( যথা বীটাট্রন, সিংক্রট্রন, প্রোটন-সিংক্রট্রন ) থেকে প্রাপ্ত উচ্চশক্তি কণিকা নিরীক্ষণের জন্যও অনেক সময় এই ব্যবস্থা অবলম্বন করা হয়। (20·16) চিত্রে কয়েকটি কেন্দ্রকীয় অবদ্রব আলোক-চিত্রের নিদর্শন দেখান হয়েছে।

## 15.7 : বুদ্বুদ-কক্ষ

১৯৫৩ সালে আমেরিকান বিজ্ঞানী গ্লেসার (D. A. Glaser) বুদ্বুদ-কক্ষ (Bubble Chamber) যন্ত্রটি উদ্ভাবিত করেন। এই যন্ত্রটিও অতি উচ্চ শক্তি সম্পন্ন বিকিরণ নিরীক্ষণ করার পক্ষে বিশেষ উপযোগী।

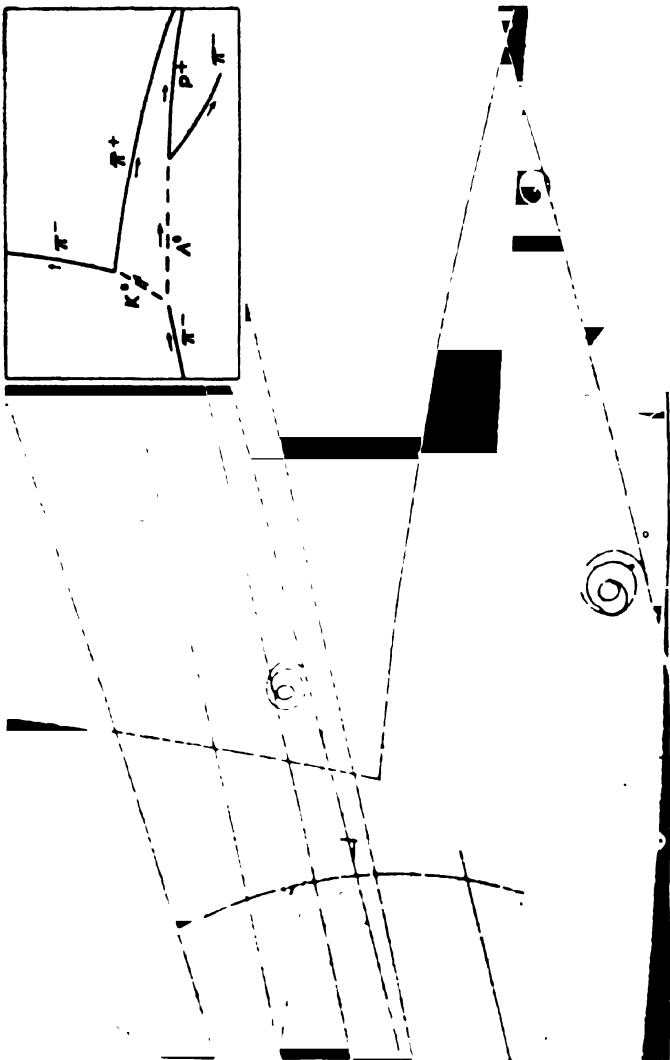
একটি আবদ্ধ আধারের মধ্যে উচ্চ চাপে বিশেষ ধরনের তরল পদার্থ

রেখে তা অতিতপ্ত (Superheated) করা হয়। সাধারণতঃ তরল-হাইড্রোজেন, প্রোপেন প্রভৃতি তরল ব্যবহার করা হয়। এই তরলের মধ্যে যদি কোন ধূলি-কণা বা অন্যরূপ অপদ্রব্যের (Impurity) কণা না থাকে, তাহলে অতিতপ্ত হওয়া সত্ত্বেও তরলের মধ্যে বাষ্পের কণা সৃষ্ট হয় না। যদি কোন আয়ন উৎপাদক কণিকা তরলের মধ্যে প্রবেশ করে, তাহলে তার সংগে সংঘাতের ফলে সৃষ্ট তরলের আণবিক আয়ন সমূহ বাষ্পকণা সৃষ্টির পক্ষে সহায়ক হয়। এই সময় যদি তরলের উপরকার চাপ সহসা হ্রাস করা হয়, তাহলে আয়নগুলির উপরে বাষ্পকণা, অর্থাৎ বুদ্বুদ সৃষ্ট হয়। অনুপ্রবিষ্ট আয়ন উৎপাদক কণিকার ভ্রমণপথের সর্বত্র এইরূপ বুদ্বুদ সৃষ্ট হওয়ার ফলে ভ্রমণপথটি (Track) দৃশ্যমান হয়। উপযুক্ত ব্যবস্থা অবলম্বন করে ভ্রমণপথের আলোকচিত্র গ্রহণও সম্ভব হয়। সমগ্র বুদ্বুদ-কক্ষটি চৌম্বক ক্ষেত্রের মধ্যে স্থাপিত করে শক্তিশালী আহিত কণিকার বক্র ভ্রমণপথের আলোকচিত্র গ্রহণ করা যায়। ভ্রমণপথের বক্রতা থেকে কণিকাটির প্রকৃতি, ভরবেগ প্রভৃতি সম্বন্ধে গুরুত্বপূর্ণ তথ্য জানা যায়।

যেহেতু বুদ্বুদ-কক্ষে কণিকাগুলি তরলের মধ্যে ভ্রমণ করে, এদের ভ্রমণ-পথের দৈর্ঘ্য মেঘ-কক্ষের মধ্যেকার ভ্রমণপথের তুলনায় অনেক কম হয়। ফলে কণিকাগুলির শক্তি খুব উচ্চ হলেও তাদের সমগ্র ভ্রমণপথ এই যন্ত্রের সাহায্যে পাওয়া যায়।

(15·9) চিত্রে বুদ্বুদ-কক্ষের সাহায্যে প্রাপ্ত কয়েকটি কণিকার ভ্রমণপথের নিদর্শন দেওয়া হয়েছে।

## 15.8 : কেলাস-নির্দেশক এবং অর্ধপরিবাহী-নির্দেশক

যদি দুটি ধাতব তড়িৎদ্বারের মধ্যে কোন অন্তরক কেলাসিত (Crystalline) পদার্থ, যথা হীরা, স্থাপিত থাকে এবং তড়িৎদ্বার দুটির মধ্যে উচ্চ বিভব প্রভেদ প্রয়োগ করা হয়, তাহলে এই সমাবেশকে উচ্চশক্তি আহিত কণিকা নির্দেশক হিসাবে ব্যবহার করা যায়। এই সমাবেশটি কতকটা কঠিন পদার্থ নির্মিত আয়নন কক্ষের মত কাজ করে। অন্তরক (Insulator) পদার্থের মধ্যে সংযোজী পটিগুলি (Valence Bands) ইলেকট্রন দ্বারা পূর্ণ থাকে (10·7 অনুচ্ছেদ দ্রষ্টব্য)। এর মধ্য দিয়ে বিচরণকালে উচ্চশক্তি আহিত কণিকাগুলি বহু সংখ্যক আয়ন-যুগল (Ion Pairs) উৎপন্ন করে। এদের মধ্যে ইলেকট্রনগুলি যথেষ্ট শক্তি অর্জন করে

চিত্র 15·9

বুদ্বুদ-কক্ষের সাহায্যে প্রাপ্ত বিভিন্ন কণিকার আলোকচিত্র ।

উচ্চতর পরিবাহী পটিতে (Conduction Bands) সংক্রমিত হয়। এই অবস্থায় এরা সহজেই বিপরীত তড়িৎদ্বার কর্তৃক আকৃষ্ট হয়ে তড়িৎপ্রবাহ উৎপন্ন করতে পারে। তাছাড়া কেলাসের মধ্যে যে সব ধনাত্মক গহ্বর (Holes) সৃষ্ট হয় সেগুলিও ঋণাত্মক তড়িৎদ্বারের দিকে আকৃষ্ট হয়ে তড়িৎপ্রবাহ উৎপন্ন করে। এই উভয় প্রকার তড়িৎপ্রবাহের প্রভাবে তড়িৎদ্বারদ্বয়ের মধ্যেকার বিভব প্রভেদের ক্ষণস্থায়ী পরিবর্তন ঘটে। এইভাবে উৎপন্ন তড়িৎ ঝলক (Pulse) সহজেই ইলেকট্রনিক পদ্ধতিতে নির্দেশিত হতে পারে এবং এদের সংখ্যাও নির্ণয় করা সম্ভব হয়।

এই জাতীয় কেলাস-নির্দেশকের ((Crystal Detector) নির্দেশ-ক্ষমতা (Efficiency) সাধারণতঃ খুব কম হয়। তবে এদের সাহায্যে খুব দ্রুতহারে আপতিত কণিকাসমূহ নির্দেশ করা যায়।

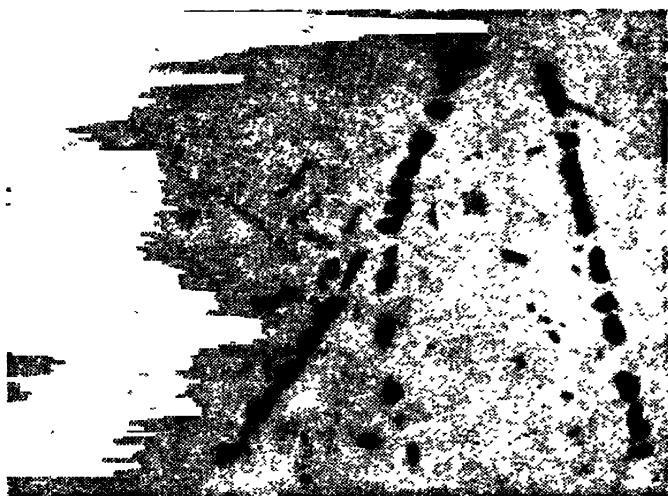
অধুনা উদ্ভাবিত অর্ধপরিবাহী-নির্দেশক (Semi Conductor Detector) কেলাস-নির্দেশক অপেক্ষা অনেক বেশী নির্দেশ-ক্ষমতা সম্পন্ন হয়। তাছাড়া এদের মধ্যে উৎপন্ন তড়িৎ ঝলক $10^{-8}$ সেকেণ্ড অপেক্ষা কম ক্ষণ স্থায়ী হয়, যার ফলে এইরূপ নির্দেশকের সাহায্যে অতি দ্রুত হারে আপতিত কণিকা নির্দেশিত করা সম্ভব হয়। একটি $p$-শ্রেণীর এবং একটি $n$-শ্রেণীর অর্ধপরিবাহী পদার্থের সংযোগ স্থলের মধ্য দিয়ে যদি একটি উচ্চশক্তি আহিত কণিকা ভ্রমণ করে, তাহলে যে সব আয়ন-যুগল উৎপন্ন হয়, তাদের মধ্যে ইলেকট্রনগুলি সহজেই অল্প-পরিসর নিষিদ্ধ শক্তি অঞ্চল (Forbidden Zone) পার হয়ে উচ্চতর পরিবাহী পটিতে (Conduction Band) উন্নীত পারে হতে ( 10·7 অনুচ্ছেদ দ্রষ্টব্য )। অর্ধপরিবাহী পদার্থ দুটির মধ্যে ধাতব তড়িৎদ্বারের সাহায্যে যদি বিভব প্রভেদ প্রযুক্ত থাকে, তাহলে এই অবস্থায় যে তড়িৎপ্রবাহ সৃষ্ট হয়, তার প্রভাবে একটি তড়িৎ ঝলক (Pulse) পাওয়া যায়। এই তড়িৎ ঝলকের বিস্তার (Pulse Amplitude) আপতিত কণিকা কর্তৃক সংযোগ অঞ্চলে ব্যয়িত শক্তির উপরে নির্ভর করে। এক্ষেত্রে প্রতিটি আয়ন-যুগল উৎপন্ন করার জন্য গড়ে মাত্র 3 ই-ভো পরিমাণ শক্তি প্রয়োজন হয়। মেঘ-কক্ষের গ্যাসের মধ্যে প্রতিটি আয়ন-যুগল উৎপন্ন করতে প্রয়োজনীয় শক্তির ( 30 ই-ভো ) তুলনায় এই শক্তি অনেক কম হয়। এই সব কারণে ভারী আয়ন-উৎপাদক কণিকা, যথা $\alpha$-কণিকা, বিভাজন-খণ্ড (Fission Fragments) ইত্যাদির শক্তি পরিমাপের জন্য অর্ধপরিবাহী-নির্দেশক খুবই উপযোগী হয়। এদের শক্তি বিশ্লেষণ ক্ষমতা (Resolving Power) খুব উচ্চ হয়।

### 15.9 : স্ফুলিংগ-কক্ষ

সাম্প্রতিক কালে ( ১৯৫৭ সালে ) স্ফুলিংগ-কক্ষ (Spark Chamber) নামক একটি যন্ত্র উচ্চশক্তি আহিত কণিকা নির্দেশের জন্য উদ্ভাবিত হয়েছে। এই যন্ত্রে একটি আবদ্ধ কক্ষের মধ্যে পরপর কয়েকটি সমান্তরাল ধাতব প্লেট সন্নিবিষ্ট থাকে। কক্ষটি কোন উদাসী গ্যাস দ্বারা পূর্ণ থাকে। পর্যায়ক্রমে একটি করে প্লেট ভূমিতলের সংগে (Grounded) এবং একটি করে প্লেট উচ্চ বিভব ( $10^4$ ভোল্ট ) উৎসের সংগে সংযুক্ত থাকে। আয়ন উৎপাদক কণিকাটি যখন কক্ষের মধ্য দিয়ে ভ্রমণ করে তখন পরপর অবস্থিত প্লেটগুলির মধ্যেকার গ্যাসে তাদের ভ্রমণপথ বরাবর ক্ষণস্থায়ী তড়িৎ স্ফুলিংগ সৃষ্ট হয়। উপযুক্ত ব্যবস্থা অবলম্বন করে এইভাবে দৃশ্যমান কণিকাটির ভ্রমণপথের আলোকচিত্র গ্রহণ করা সম্ভব হয়।

(15·10) চিত্রে স্ফুলিংগ-কক্ষের মধ্যে উৎপন্ন একটি উচ্চশক্তি আহিত কণিকার ভ্রমণপথের নিদর্শন প্রদর্শিত হয়েছে।

### 15.10 : চেরেনকভ্-সংখ্যায়ক

যখন কোন মাধ্যমের মধ্য দিয়ে একটি আহিত কণিকা উক্ত মাধ্যমে আলোকের বেগ অপেক্ষা দ্রুততর বেগে পরিভ্রমণ করে, তখন কণিকাটি দৃশ্যমান বা অতিবেগনী আলোক নিঃসৃত করে। এইভাবে নিঃসৃত আলোককে বলা হয় চেরেনকভ্ বিকিরণ (Cerenkov Radiation)। যদি মাধ্যমটি নিঃসৃত বিকিরণের পক্ষে স্বচ্ছ হয়, তাহলে উক্ত বিকিরণ মাধ্যম থেকে নির্গত হতে পারে। এই নির্গত বিকিরণ যদি একটি আলোক তাড়িত পরিবর্ধক কোষের (Photo Multiplier) ফোটো-ক্যাথোডের উপরে আপতিত করান যায়, তাহলে কোষের অ্যানোডে একটি তড়িৎ ঝলক (Pulse) উৎপন্ন হয়। উপযুক্ত ইলেকট্রনিক পদ্ধতির সাহায্যে এই ঝলক নির্দেশ করার এবং এদের সংখ্যা গণনা করার ব্যবস্থা করা যায়। এইরূপ সংখ্যায়ককে বলা হয় চেরেনকভ্ সংখ্যায়ক (Cerenkov Counter)। এই সংখ্যায়কের সাহায্যে আপতিত বিকিরণের শক্তি নির্ণয় করা যায়।

চিত্র 15·10

স্ফুলিংগ কক্ষের সাহায্যে প্রাপ্ত আলোকচিত্র।

পরিচ্ছেদ 16

# পরমাণবিক ভর নির্ণয় ; কেন্দ্রকের গঠন

## 16.1 : পরমাণবিক ভর সঠিকভাবে নির্ণয় করার প্রয়োজনীয়তা

মোক্ষণ নলের মধ্যে উৎপন্ন ধনাত্মক রশ্মি (Positive Rays) সংক্রান্ত পরীক্ষা করতে গিয়ে টমসন (J. J. Thomson) নীয়ন মৌলের আইসোটোপের অস্তিত্ব আবিষ্কার করেন। তাঁর আবিষ্কারকে আরও সুদৃঢ় ভিত্তিতে প্রতিষ্ঠিত করেন বৃটিশ বিজ্ঞানী অ্যাষ্টন (F. Aston)। (2·9) অনুচ্ছেদে উল্লেখ করা হয়েছে যে অ্যাষ্টন ভর বর্ণালীলেখ যন্ত্র (Mass Spectrograph) উদ্ভাবিত করে তার সাহায্যে নীয়নের দুটি আইসোটোপের ভর সঠিক ভাবে পরিমাপ করে দেখান যে এদের ভর হচ্ছে 20 এবং 22 ; অর্থাৎ এই দুটি আইসোটোপের পরমাণবিক ভর যে প্রকৃতই নীয়নের রাসায়নিক পরমাণবিক ভার 20·2 থেকে পৃথক তা তিনি সংশয়াতীতভাবে প্রমাণ করেন। পরবর্তীযুগে অ্যাষ্টন তাঁর ভর বর্ণালীলেখ যন্ত্র উন্নত করে আরও অনেক সঠিকভাবে বিভিন্ন আইসোটোপের পরমাণবিক ভর নির্ণয় করেন। তাছাড়া ডেম্প্‌ষ্টার (Dempster), বেনব্রিজ (Bainbridge), মাতাউখ্‌ (Mattauch) প্রভৃতি বিজ্ঞানীগণ কর্তৃক উদ্ভাবিত বিভিন্ন ধরনের সূক্ষ্ম ভর বর্ণালীবীক্ষণ যন্ত্রের সাহায্যে বর্তমানে অত্যন্ত সঠিকভাবে পরমাণবিক ভর নির্ণয় করা যায়। এই সব পদ্ধতিতে দশলক্ষ ভাগে একভাগ অপেক্ষা কম ত্রুটি সহকারে পরমাণবিক ভর নির্ণয় করা সম্ভব।

এত সঠিকভাবে পরমাণবিক ভর নির্ণয় করার প্রয়োজনীয়তা দেখা দেয় পরমাণু কেন্দ্রকের রূপান্তর সম্পর্কিত পরীক্ষা করার সময়। তেজস্ক্রিয় বিঘটনের ফলে নিঃসৃত $\alpha$, $\beta$ প্রভৃতি কণিকাসমূহ যে বিপুল শক্তি সহকারে নির্গত হয়, সেই শক্তি তারা পায় কেন্দ্রকের ভর থেকে। আইনষ্টাইনের ভর-শক্তি সমতা সম্পর্ক ( সমীকরণ 8·26) অনুযায়ী $m$ ভর যখন শক্তিতে রূপান্তরিত হয় তখন $mc^2$ পরিমাণ শক্তি উৎপন্ন হয়। (12·6) অনুচ্ছেদে আমরা দেখেছি যে, $M(A, Z)$ পরমাণবিক ভর সম্পন্ন কোন পরমাণু যদি $M_\alpha$ পরমাণবিক ভর সম্পন্ন $\alpha$-কণিকা নিঃসৃত করে $M$ $(A-4,$

$Z-2$) পরমাণবিক ভর সম্পন্ন পরমাণুতে রূপান্তরিত হয়, তাহলে α-বিঘটন শক্তি (Disintegration Energy) হয়

$$Q_{\alpha}=\{M(A, Z)-M_{\alpha}-M\ (A-4, Z-2)\}c^{2}$$

অনুরূপে β-বিঘটনের ক্ষেত্রে আদি এবং অবশিষ্ট পরমাণুর ভর পার্থক্য থেকে β-বিঘটন শক্তি ($Q_{\beta}$) নির্ণয় করা যায় (13·7 অনুচ্ছেদ দ্রষ্টব্য)। এইসব বিঘটন শক্তির মান কয়েক মিলিয়ন ($10^{6}$) ইলেকট্রন ভোল্ট মত হয়। এই শক্তি কিন্তু বিঘটনে অংশ গ্রহণকারী আদি এবং অবশিষ্ট পরমাণুদ্বয়ের সমগ্র ভর-শক্তির তুলনায় অনেক কম হয়। এই তথ্য সহজেই প্রমাণ করা যায়। যেহেতু $O^{16}$ আইসোটোপের পরমাণবিক ভর হচ্ছে 16, অতএব 16 গ্রাম $O^{16}$ আইসোটোপের মধ্যে পরমাণু সংখ্যা হচ্ছে $N$ অ্যাভোগেড্রো সংখ্যার সমান। সুতরাং প্রতিটি $O^{16}$ পরমাণুর ভর $16/N$ গ্রাম হয়। যেহেতু পরম্যাণবিক ভরের ভৌত একক (Atomic Mass Unit) হচ্ছে $O^{16}$ পরমাণুর ভরের ষোল ভাগের এক ভাগের সমান, অতএব আমরা পাই

$$1\ amu=\frac{1}{16}\times\frac{16}{N}=\frac{1}{N}=\frac{1}{6·025\times10^{23}}$$

$$=1·66\times10^{-24}\text{ গ্রাম} \qquad (16·1)$$

আইনষ্টাইনের সূত্র অনুযায়ী এই ভরের সমতুল শক্তি হচ্ছে

$$1\ amu=1·66\times10^{-24}\times c^{2}$$

$$=1·66\times10^{-24}\times8·988\times10^{20}$$

$$=1·492\times10^{-3}\text{ আর্গ}$$

$$=\frac{1·492\times10^{-3}}{1·602\times10^{-6}}=931·2\text{ মি-ই-ভো} \qquad (16·2)$$

অর্থাৎ এক একক পরমাণবিক ভর 931·2 মিলিয়ন ইলেকট্রন-ভোল্ট পরিমাণ শক্তির সমতুল (Equivalent) হয়।

হাইড্রোজেনের $H^{1}$ আইসোটোপের (অর্থাৎ একটি প্রোটন এবং একটি ইলেকট্রনের সমন্বয়ের) পরমাণবিক ভর হচ্ছে $M_{H}=1·008145\ amu$; এর সমতুল শক্তি হচ্ছে

$$M_{H}c^{2}=938·78\text{ মি-ই-ভো} \qquad (16·3)$$

অনুরূপে নিউট্রনের পরমাণবিক ভর হচ্ছে $M_n = 1{\cdot}008986 \quad amu$ ; সুতরাং এর সমতুল শক্তি হচ্ছে

$$M_n c^2 = 939{\cdot}57 \text{ মি-ই-ভো} \qquad (16{\cdot}4)$$

যেহেতু ইলেকট্রনের স্থির-ভর (Rest Mass) হচ্ছে $m_0 = 9{\cdot}108 \times 10^{-28}$ গ্রাম, সুতরাং পরমাণবিক ভরের এককে ইলেকট্রনের ভর হচ্ছে

$$m_0 = \frac{9{\cdot}108 \times 10^{-28}}{1{\cdot}66 \times 10^{-24}} = 0{\cdot}000548 \; amu \qquad (16{\cdot}5)$$

এর সমতুল শক্তি হচ্ছে

$$m_0 c^2 = 0{\cdot}548 \times 10^{-3} \times 931{\cdot}2 = 0{\cdot}511 \text{ মি-ই-ভো} \qquad (16{\cdot}6)$$

উপরে প্রদত্ত রাশিমালা (Data) থেকে প্রতীয়মান হয় যে তেজস্ক্রিয় বিকিরণের শক্তি ( যা কয়েক মিলিয়ন ইলেকট্রন ভোল্টের মত হয় ) তেজস্ক্রিয় বিঘটনে অংশ গ্রহণকারী পরমাণুসমূহের ভরের স্বল্পাংশ মাত্র হয়। এই শক্তি যে সত্য সত্যই আদি এবং অবশিষ্ট পরমাণুগুলির ভরের পার্থক্য থেকে পাওয়া যায় তা প্রমাণ করতে হলে অবশ্যই বিভিন্ন পরমাণুর ভর অত্যন্ত সঠিক ভাবে নিরূপণ করা প্রয়োজন। তাছাড়া কৃত্রিম উপায়ে কেন্দ্রক রূপান্তরের (Artificial Transformation of Nuclei) সময়ে কোন বিশেষ রূপান্তর সংঘটিত করতে প্রয়োজনীয় শক্তির মান ঠিক ভাবে নিরূপণ করতে হলেও বিক্রিয়ায় অংশ গ্রহণকারী পরমাণুসমূহের ভর খুব সঠিক-ভাবে নির্ণয় করা প্রয়োজন।

উদাহরণস্বরূপ $Ra^{226} \xrightarrow{\alpha} Rn^{222}$ বিঘটনে অংশ গ্রহণকারী পরমাণু-সমূহের ভর হচ্ছে যথাক্রমে ঃ

$$M(Ra^{226}) = 226{\cdot}09600 \; amu$$

$$M(Rn^{222}) = 222{\cdot}08690 \; amu$$

$$M_\alpha = 4{\cdot}00387 \; amu$$

সুতরাং $\alpha$-বিঘটন শক্তি হচ্ছে

$$Q_\alpha = \{M(Ra^{226}) - M(Rn^{222}) - M_\alpha\} c^2$$

$$= (226{\cdot}09600 - 222{\cdot}08690 - 4{\cdot}00387) \times 931{\cdot}2$$

অর্থাৎ

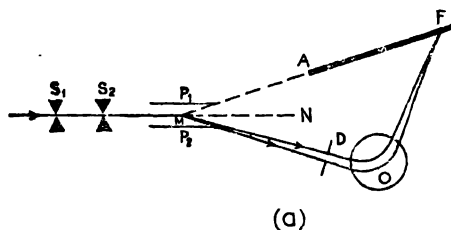
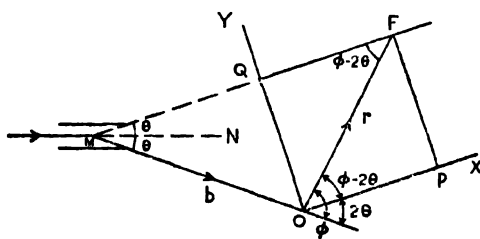
$$Q_a = 0\cdot00523 \times 931\cdot2$$
$$= 4\cdot87 \text{ মি-ই-ভো}$$

উপরের গণনাসমূহ থেকে দেখা যায় এই বিঘটন শক্তি বিঘটনে অংশ গ্রহণকারী আদি বা অবশিষ্ট কেন্দ্রকদ্বয়ের ভর শক্তির 40,000 ভাগে এক ভাগ অপেক্ষা কম হয়। স্পষ্টতঃ এক্ষেত্রে পরমাণুগুলির ভর এক লক্ষে এক ভাগ অপেক্ষা সঠিকতর ভাবে নির্ণীত না হলে বিঘটন শক্তি সম্পর্কিত উপরোক্ত তত্ত্বের যাথার্থ্য যাচাই করা সম্ভব নয়।

## 16.2 : অ্যাষ্টনের ভর বর্ণালীলেখ যন্ত্র ; কার্যপ্রণালী

এই যন্ত্রের কার্য পদ্ধতি (16·1$a$) চিত্রের সাহায্যে ব্যাখ্যা করা যায়। একটি মোক্ষণ নলের মধ্যে উৎপন্ন ধনাত্মক আয়নগুচ্ছকে কয়েকটি রেখাছিদ্রের (Slits) সাহায্যে যতদূর সম্ভব সূক্ষ্মভাবে সমান্তরিত (Collimated) করা

(a)

(b)

চিত্র 16·1

অ্যাষ্টনের ভর বর্ণালীলেখ যন্ত্রের কার্যপ্রণালী।

হয়। একটি পাতলা ফিতার (Ribbon) আকারে সমান্তরিত এই আয়ন-গুচ্ছকে দুটি ধাতব প্লেটের মধ্যে প্রযুক্ত $X$ তড়িৎক্ষেত্রে প্রবেশ করান হয়। তড়িৎক্ষেত্রের প্রভাবে আয়নগুচ্ছ $\theta$ কোণে বিচ্যুত হয়। এই আয়ন-গুচ্ছে যদি $v$ থেকে $v+dv$ সীমার মধ্যে অবস্থিত বেগ সম্পন্ন আয়ন বর্তমান থাকে তাহলে তড়িৎক্ষেত্রের প্রভাবে তারা $\theta$ থেকে $\theta-d\theta$ কৌণিক সীমার মধ্যে বিচ্যুত হয়। তড়িৎক্ষেত্র থেকে নির্গত আয়নগুলির বিচ্যুতির উপরোক্ত কৌণিক সীমা $D$ রেখাছিদ্রের সাহায্যে নির্ধারিত করা হয়।

(2·4) অনুচ্ছেদে $X$ তড়িৎক্ষেত্রের প্রভাবে $v$ বেগ সম্পন্ন একটি ধনাত্মক আয়নের বিচ্যুতি নির্ণয় করা হয়েছে। (2·7) সমীকরণ থেকে দেখা যায় এই বিচ্যুতি তড়িৎক্ষেত্র অভিমুখে ঘটে এবং এর মান আয়নের বেগের বর্গের ব্যস্তানুপাতিক হয়। সুতরাং আমরা লিখতে পারি

$$\theta=K_1\frac{X\varepsilon}{Mv^2} \tag{16·7}$$

এখানে $K_1$ একটি ধ্রুবক ; $\varepsilon$ এবং $M$ যথাক্রমে আয়নের আধান ও ভর নির্দেশ করে। সমীকরণ (16·7) থেকে নির্দিষ্ট $\varepsilon/M$ সম্পন্ন আয়নের ক্ষেত্রে আমরা পাই

$$\theta v^2=K_1X\varepsilon/M=\text{ধ্রুবক} \tag{16·8}$$

সমীকরণ (16·8) অবকলন করলে পাওয়া যায়

$$v^2d\theta+2\theta v dv=0$$

এই সমীকরণকে $\theta v^2$ দ্বারা ভাগ করলে পাওয়া যায়

$$\frac{d\theta}{\theta}+2\frac{dv}{v}=0 \tag{16·9}$$

সমীকরণ (16·9) থেকে $dv$ সীমার মধ্যে অবস্থিত বেগ সম্পন্ন আয়ন-সমূহের কৌণিক বিচ্যুতির সীমা $d\theta$ পাওয়া যায়।

তড়িৎক্ষেত্র থেকে নির্গত আয়নগুলি $b$ দূরত্বে অবস্থিত একটি চৌম্বক ক্ষেত্রে প্রবেশ করে। একটি বৈদ্যুতিক চুম্বকের সাহায্যে পুস্তকের পাতার অভিলম্বে এই চৌম্বক ক্ষেত্র $H$ প্রয়োগ করা হয়। চৌম্বক ক্ষেত্রের ক্রিয়ার ফলে আয়নগুলি পুস্তকের পাতার সমতলে, অর্থাৎ তাড়িত বিচ্যুতির সংগে

একই সমতলে, বিচ্যুত হয়। চৌম্বক ক্ষেত্রের দিক এমনভাবে নির্দিষ্ট করা হয় যে চৌম্বক বিচ্যুতি তাড়িত বিচ্যুতির বিপরীত দিকে ঘটে।

(2·4) অনুচ্ছেদে $H$ চৌম্বক ক্ষেত্রের প্রভাবে $v$ বেগ সম্পন্ন আয়নের বিচ্যুতি নির্ণয় করা হয়েছে। (2·8) সমীকরণ থেকে চৌম্বক ক্ষেত্রের জন্য কৌণিক বিচ্যুতি পাওয়া যায়

$$\phi = K_2 \frac{H\varepsilon}{Mv} \tag{16·10}$$

এখানে $K_2$ একটি ধ্রুবক। নির্দিষ্ট $\varepsilon/M$ সম্পন্ন আয়নের ক্ষেত্রে আমরা পাই

$$\phi v = K_2 H\varepsilon/M = \text{ধ্রুবক} \tag{16·11}$$

সমীকরণ (16·11) থেকে অবকলন করে পাওয়া যায়

$$v d\phi + \phi dv = 0$$

এই সমীকরণকে $\phi v$ দ্বারা ভাগ করে পাওয়া যায়

$$\frac{d\phi}{\phi} + \frac{dv}{v} = 0 \tag{16·12}$$

সমীকরণ (16·12) থেকে $dv$ বেগ সীমার মধ্যে অবস্থিত আয়নসমূহের কৌণিক বিচ্যুতির সীমা $d\phi$ পাওয়া যায়। তড়িৎক্ষেত্র থেকে নির্গত বিভিন্ন বেগ সম্পন্ন আয়নগুলি $d\theta$ কৌণিক সীমার মধ্যে বিচ্ছুরিত (Dispersed) হয়ে যখন চৌম্বক ক্ষেত্রে প্রবেশ করে, তখন তারা আবার চৌম্বক ক্ষেত্রের প্রভাবে $d\phi$ কৌণিক সীমার মধ্যে বিচ্ছুরিত হয়। চৌম্বক বিচ্যুতি ও তাড়িত বিচ্যুতি বিপরীতমুখী হওয়ার ফলে চৌম্বক ক্ষেত্রজ বিচ্ছুরণ তড়িৎক্ষেত্রজ বিচ্ছুরণকে বাতিল করে বিভিন্ন বেগ সম্পন্ন আয়নগুলিকে চৌম্বক ক্ষেত্র থেকে $r$ দূরত্বে A ফোটোগ্রাফিক প্লেটের F বিন্দুতে পুনর্ফোকাসিত করতে পারে। এইভাবে ফোকাসিত হওয়ার শর্ত হচ্ছে যে তড়িৎক্ষেত্র থেকে $(b+r)$ দূরত্বে আয়নগুচ্ছের রৈখিক তাড়িত বিচ্ছুরণ (Linear Electric Dispersion) $(b+r)\,d\theta$ চৌম্বক ক্ষেত্র থেকে $r$ দূরত্বে উৎপন্ন রৈখিক চৌম্বক বিচ্ছুরণের সমান হওয়া প্রয়োজন। অর্থাৎ ফোকাস-শর্ত হচ্ছে

$$(b+r)d\theta = r d\phi \tag{16·13}$$

সমীকরণ (16·9) এবং (16·12) থেকে পাওয়া যায়

$$\frac{d\theta}{\theta} = 2\frac{d\phi}{\phi} \tag{16·14}$$

সমীকরণ (16·13) এবং (16·14) থেকে আমরা পাই

$$\frac{d\theta}{d\phi} = \frac{r}{b+r} = \frac{2\theta}{\phi}$$

অথবা $$r(\phi - 2\theta) = 2b\theta$$

$$\frac{r}{b} = \frac{2\theta}{\phi - 2\theta} \tag{16·15}$$

(16·15) সমীকরণের সাহায্যে চৌম্বক ক্ষেত্র থেকে আয়ন ফোকাস দূরত্ব $r$ পাওয়া যায়। এর মান নির্ভর করে আয়নগুলির $\varepsilon/M$ এর উপরে।

সমীকরণ (16·15) অনুযায়ী প্রাপ্ত বিভিন্ন $\varepsilon/M$ সম্পন্ন আয়নগুচ্ছের ফোকাস-বিন্দুগুলির সঞ্চার-পথের (Locus) উপরে যদি একটি ফোটোগ্রাফিক প্লেট (A) স্থাপিত করা যায়, তাহলে এইসব আয়ন ফোটোগ্রাফিক প্লেটের বিভিন্ন বিন্দুতে ফোকাসিত হবে ( চিত্র 16·1$a$ )।

ফোকাস-বিন্দুগুলির সঞ্চার-পথের প্রকৃতি নিম্নলিখিত উপায়ে নির্ণয় করা যায়। (16·1$b$) চিত্রে M এবং O হচ্ছে যথাক্রমে তড়িৎক্ষেত্রের ও চৌম্বক ক্ষেত্রের মধ্যবিন্দু এবং F হচ্ছে আয়ন ফোকাস-বিন্দু। MO সরলরেখার বর্ধিতাংশের সংগে যদি $2\theta$ কোণে OX এবং $\phi$ কোণে OF সরলরেখাদ্বয় অংকিত করা যায়, তাহলে OX ও OF রেখাদ্বয়ের অন্তর্গত কোণ $(\phi - 2\theta)$ হয়। চিত্রে MN সরলরেখাটি আয়নগুচ্ছের প্রাথমিক গতিমুখ ( অর্থাৎ তড়িৎক্ষেত্রে প্রবেশ করার দিক ) নির্দেশ করে। স্পষ্টতঃ MN এবং MO রেখাদ্বয়ের অন্তর্গত কোণ $\theta$ হবে। মনে করা যাক যে OY হচ্ছে OX সরলরেখার অভিলম্বে অংকিত একটি সরলরেখা এবং FP ও FQ হচ্ছে F বিন্দু থেকে OX এবং OY সরলরেখা দুটির উপরে অংকিত দুটি লম্ব।

সমীকরণ (16·15) থেকে দেখা যায় যে, যখন $\phi = 2\theta$ হয়, তখন $r = \infty$ হয়। অর্থাৎ যদি চৌম্বক বিচ্যুতি $\phi = 2\theta$ হয়, তাহলে আয়নগুলি অসীম দূরত্বে ফোকাসিত হবে এবং চৌম্বক ক্ষেত্র থেকে আয়নগুলি সমান্তরাল গুচ্ছ হিসাবে নির্গত হবে। O থেকে সীমিত দূরত্বে আয়নগুচ্ছ

ফোকাসিত করার জন্য $\phi > 2\theta$ হওয়া প্রয়োজন। (16·1$b$) চিত্র থেকে F বিন্দুটির $x$ এবং $y$ স্থানাংক (Coordinates) পাওয়া যায় :

$$x_F = r\cos(\phi - 2\theta) = OP$$

$$y_F = r\sin(\phi - 2\theta) \simeq r(\phi - 2\theta) = OQ$$

এখানে অনুমান করা হয়েছে যে $\theta$ এবং $\phi$ কোণ দুটির মান খুব কম। (16·15) সমীকরণের সাহায্যে পাওয়া যায়

$$y_F = OQ = r(\phi - 2\theta) = b.2\theta$$

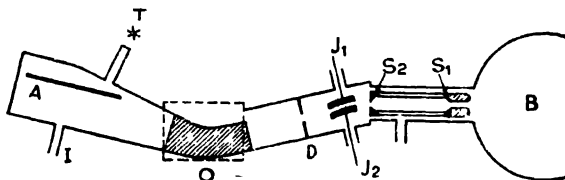
অ্যাষ্টনের ভর বর্ণালীলেখ যন্ত্রে $b$ এবং $\theta$ ধ্রুবক রাখা হয়। সুতরাং $y_F$ ধ্রুবক হয়। অর্থাৎ OX রেখা থেকে বিভিন্ন ফোকাস-বিন্দুর দূরত্ব সমান হয়। এর থেকে বোঝা যায় যে OX রেখার সমান্তরালে অংকিত FQ সরলরেখাটি হচ্ছে ফোকাস-বিন্দুগুলির সঞ্চার পথ (Locus)।

(16·1$b$) চিত্র থেকে সহজেই প্রতীয়মান হয় যে, MOF ত্রিভুজে MO এবং MF বাহুদ্বয়ের অন্তর্গত কোণ $2\theta$ হয়। সুতরাং MF ও OX সরলরেখা দুটি পরস্পরের সমান্তরাল। অর্থাৎ MF এবং FQ একই সরলরেখা এবং ফোটোগ্রাফিক প্লেটটিকে এই সরলরেখা বরাবর স্থাপিত রাখতে হবে। স্পষ্টতঃ এই সরলরেখাটি আয়নগুচ্ছের প্রাথমিক গতিমুখ MN এর সংগে $\theta$ কোণে বিন্যস্ত থাকে।

তড়িৎক্ষেত্র $X$ অপরিবর্তিত রাখলে সমান শক্তি কিন্তু বিভিন্ন ভর সম্পন্ন আয়নের তাড়িত বিচ্যুতি $\theta$ ধ্রুবক হয় ( 16·7 সমীকরণ দ্রষ্টব্য )। এইসব আয়ন চৌম্বক ক্ষেত্র থেকে নির্গত হয়ে ফোটোগ্রাফিক প্লেটের বিভিন্ন বিন্দুতে ফোকাসিত হয়।

অ্যাষ্টনের ভর বর্ণালীলেখ যন্ত্রে প্রাথমিক আয়নগুচ্ছের কোন কৌণিক বিস্তার থাকে না বলে ধরা হয়। তবে একই $\varepsilon/M$ সম্পন্ন আয়নগুচ্ছের অল্প পরিমাণ বেগ বিস্তার থাকে। যেহেতু এই সব একই $\varepsilon/M$ কিন্তু বিভিন্ন বেগ সম্পন্ন আয়নগুচ্ছ ফোটোগ্রাফিক প্লেটের উপরে একই বিন্দুতে ফোকাসিত হয়, এই জাতীয় যন্ত্রকে বলা হয় 'বেগ-ফোকাস ভর বর্ণালীলেখ যন্ত্র' (Velocity Focusing Mass Spectrograph)।

**16.3 : অ্যাষ্টনের ভর বর্ণালীলেখ যন্ত্রের সাহায্যে সঠিক ভাবে পরমাণবিক ভর নির্ণয়**

(16·2) চিত্রে অ্যাষ্টনের ভর বর্ণালীলেখ যন্ত্রের একটি সরল নকশা প্রদর্শিত হয়েছে। ১৯১৯ সালে অ্যাষ্টন তাঁর প্রথম যন্ত্রটি নির্মাণ করেন।

চিত্র 16·2

অ্যাষ্টনের ভর বর্ণালীলেখ যন্ত্রের সরল নকশা।

এর সাহায্যে তিনি এক সহস্রে এক ভাগ সঠিকতা (Accuracy) সহকারে পরমাণবিক ভর নির্ণয় করেন। পরে আরও উন্নত ধরনের যন্ত্রের সাহায্যে তিনি দশ সহস্রে একভাগ সঠিকতা সহকারে পরমাণবিক ভর নির্ণয় করতে সমর্থ হন।

(16·2) চিত্রে B একটি বড় বাল্ব যার মধ্যে ধনাত্মক আয়ন উৎপন্ন হয়। একই আধান কিন্তু বিভিন্ন ভর সম্পন্ন আয়নগুলি $V$ বিভবের প্রভাবে সমপরিমাণ শক্তি $\varepsilon V$ অর্জন করে $S_1$, $S_2$ প্রভৃতি সূক্ষ্ম রেখাছিদ্রের মধ্য দিয়ে পার হয়ে সমান্তরিত (Collimated) রশ্মিগুচ্ছের আকারে নিঃসৃত হয়। নিঃসৃত আয়নগুচ্ছ প্রথমে $J_1$, $J_2$ তড়িৎদ্বার দুটির মধ্যে প্রযুক্ত বিভব প্রভেদের প্রভাবে বিচ্যুত হয়। বিচ্যুত আয়নগুচ্ছ D রেখাছিদ্র পার হয়ে O অঞ্চলে চৌম্বক ক্ষেত্রের মধ্যে প্রবেশ করে। চৌম্বক ক্ষেত্রের দ্বারা বিচ্যুত হয়ে আয়নগুচ্ছ A ফোটোগ্রাফিক প্লেটের উপরে ফোকাসিত হয়। যেহেতু পুস্তকের পাতার অভিলম্বে বিভিন্ন রেখাছিদ্রগুলির সীমিত দৈর্ঘ্য থাকে, সেইজন্য আয়নগুলি ফোটোগ্রাফিক প্লেটের উপরে কতকগুলি বিন্দুতে ফোকাসিত না হয়ে এক একটি সীমিত দৈর্ঘ্য সম্পন্ন সরলরেখা বরাবর ফোকাসিত হয়। এই রেখাগুলিকে বলা হয় ভর-রেখা (Mass Line)। সমগ্র যন্ত্রটি একটি আবদ্ধ আধারের মধ্যে স্থাপিত থাকে এবং আধারটি খুব নিম্ন বায়ুচাপে রাখা হয়। A ফোটোগ্রাফিক প্লেটের উপরে নির্দিষ্ট বিন্দুতে আলোকপাত করে একটি নির্দেশক বিন্দু (Fiducial Point) উৎপন্ন করার ব্যবস্থা থাকে।

অ্যাষ্টন প্রথমে কয়েকটি পূর্ব পরিমিত ভর সম্পন্ন আয়নের সহায্যে ফোটোগ্রাফিক প্লেটটিকে ক্রমাংকিত (Calibrate) করেন। নির্দেশক বিন্দু থেকে প্লেটের উপরে ফোকাসিত এইসব আয়নের ভর-রেখা সমূহের (Mass Lines) দূরত্ব সঠিক ভাবে মাপা যায়। তারপর আইসোটোপগুলির ভরের সংগে ভর-রেখাগুলির দূরত্বের একটি লেখচিত্র অংকন করা হয়। এটিকে বলা যেতে পারে ক্রমাংকন লেখচিত্র (Calibration Curve)। এখন একটি অজ্ঞাত ভর আয়নের ভর-রেখার দূরত্ব উক্ত নির্দেশক বিন্দু থেকে পরিমাপ করলে, ক্রমাংকন লেখচিত্রের সাহায্যে আয়নটির ভর নির্ণয় করা যায়। অ্যাষ্টন অক্সিজেনের পরমাণবিক ভর ঠিক 16 বলে ধরে নেন এবং অন্যান্য পরমাণুর ভর অক্সিজেনের সাপেক্ষে নির্ণয় করেন। পরবর্তী যুগে অবশ্য অক্সিজেনের মধ্যে সর্বাধিক পরিমাণে বর্তমান $O^{16}$ আইসোটোপের পরমাণবিক ভর ঠিক 16 ধরে অন্যান্য পরমাণুর ভর নির্ণয় করা হয় (2·10 অনুচ্ছেদ দ্রষ্টব্য)।

পরে অ্যাষ্টন 'বন্ধনী-পদ্ধতি' (Method of Bracketing) অবলম্বন করে আরও সঠিক ভাবে পরমাণবিক ভর নির্ণয় করেন।

এই পদ্ধতিতে $M_1$ এবং $M_2$ ভর সম্পন্ন দুই প্রকার পরমাণুর ভর তুলনা করা হয়। এদের আয়নীয় আধান যদি সমান হয়, তাহলে (16·7) সমীকরণ অনুযায়ী তড়িৎক্ষেত্রের দ্বারা এদের সমপরিমাণ বিচ্যুতি $(\theta_1 = \theta_2)$ ঘটবার শর্ত হচ্ছে

$$\frac{X_1}{M_1 v_1^2} = \frac{X_2}{M_2 v_2^2}$$

এখানে $v_1$ এবং $v_2$ হচ্ছে দুই প্রকার আয়নের বেগ এবং $X_1$ ও $X_2$ হচ্ছে এই দুই ক্ষেত্রে প্রয়োজনীয় তড়িৎক্ষেত্র প্রাবল্যের মান। যদি এই দুই ক্ষেত্রে $J_1$, $J_2$ প্লেটদ্বয়ের মধ্যে প্রযুক্ত বিভব প্রভেদ $V_1$ এবং $V_2$ হয়, তাহলে আমরা পাই

$$\frac{M_1 v_1^2}{M_2 v_2^2} = \frac{V_1}{V_2} \qquad (16·16)$$

$\theta$ কোণে বিচ্যুত এই দুই প্রকার আয়ন চৌম্বক ক্ষেত্রে প্রবেশ করে। যদি চৌম্বক ক্ষেত্রের মান $(H)$ অপরিবর্তিত থাকে, তাহলে এই দুই প্রকার আয়নের চৌম্বক বিচ্যুতি হয় (সমীকরণ 16·10 দ্রষ্টব্য)

$$\phi_1 = K_2 H\varepsilon / M_1 v_1$$
$$\phi_2 = K_2 H\varepsilon / M_2 v_2$$
অর্থাৎ $$\phi_1/\phi_2 = M_2 v_2 / M_1 v_1$$

যদি চৌম্বক বিচ্যুতি দুই প্রকার আয়নের ক্ষেত্রে সমান হয়, $(\phi_1 = \phi_2)$, তাহলে দুই প্রকার আয়নই ফোটোগ্রাফিক প্লেটের একই বিন্দুতে ফোকাসিত হবে।

এক্ষেত্রে আমরা পাই

$$M_1 v_1 = M_2 v_2 \qquad (16\cdot17)$$

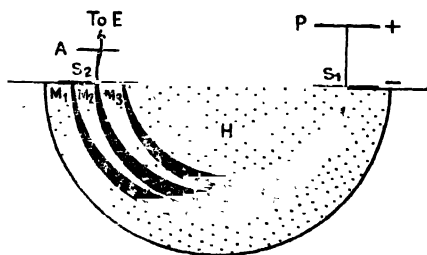
(16·16) এবং (16·17) সমীকরণ থেকে পাওয়া যায়

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{M_2}{M_1} = n \quad (\text{ধরা যাক}) \qquad (16\cdot18)$$

অর্থাৎ $M_2 = nM_1$ ভর সম্পন্ন আয়নগুলিকে $M_1$ ভর সম্পন্ন আয়নের সংগে একই বিন্দুতে ফোকাসিত করতে হলে তাড়িত বিচ্যুতি-কারক বিভব প্রভেদ $V_2 = V_1/n$ হওয়া প্রয়োজন। স্পষ্টতঃ যদি $V_2$ বিভব প্রভেদের মান এর থেকে অল্প বেশী বা কম হয়, তাহলে $M_2$ আয়নের ফোকাস-রেখা ( ভর-রেখা ) এবং $M_1$ আয়নের ফোকাস-রেখার মধ্যে অল্প ব্যবধান থাকবে, এবং দুই প্রকার আয়নের জন্য দুটি পৃথক ভর-রেখা উৎপন্ন হবে। যদি $M_2$ আয়নের ক্ষেত্রে বিচ্যুতি-কারক বিভব প্রভেদ একবার $V_2 = V_1/n + \Delta V$ এবং আর একবার $V_2 = V_1/n - \Delta V$ করা হয়, তাহলে $M_1$ আয়নের ভর-রেখার দুই পাশে সমান দূরত্বে $M_2$ আয়নের জন্য দুটি ভর-রেখা উৎপন্ন হবে। $n$ সংখ্যাটিকে ক্রমশঃ অল্প অল্প পরিবর্তিত করে ফোটোগ্রাফিক প্লেটের উপরে $M_1$ আয়নের ভর-রেখার দুই ধারে $M_2$ আয়নের ভর-রেখা দুটি সমান দূরত্বে উৎপন্ন হচ্ছে কী না তা দেখা হয়। $n$ এর যে মানে এইরূপ ঘটে, তার থেকে $M_2 = nM_1$ প্রতিপন্ন করা হয়। সাধারণতঃ $n$ সংখ্যাটির মান মোটামুটিভাবে জানা থাকে। উদাহরণ-স্বরূপ $O^{16+}$ এবং $S^{32+}$ আয়নের ক্ষেত্রে $n$ প্রায় $\frac{1}{2}$ হয় জানা আছে। যদি $n$ ঠিক $\frac{1}{2}$ হত, তাহলে $V_2 = 2V_1 \pm \Delta V$ বিভব প্রভেদে $O^{16+}$ আয়নের ভর-রেখা দুটি $S^{32+}$ আয়নের ভর-রেখার দুই পাশে সমদূরত্বে উৎপন্ন হত। প্রকৃতপক্ষে কিন্তু তা হয় না। এর থেকে বোঝা যায়

যে $O^{16+}$ আয়নের ভর $S^{32+}$ আয়নের ভরের ঠিক অর্ধেক নয়। বস্তুতঃ এক্ষেত্রে $O^{16+}$ আয়নের ভর-রেখা দুটি $S^{32+}$ আয়নের ভর-রেখার দুই পাশে অসমঞ্জস ভাবে (Asymmetrically) উৎপন্ন হয়। অনেক সময় এই অসামঞ্জস্য পরিমাপ করে ক্রমাংকন লেখচিত্রের (Calibration Curve) সাহায্যে একটি আয়নের ভর অন্যটির সাপেক্ষে নির্ণয় করা যায়। এই পদ্ধতিতে খুব সঠিক পরিমাপ সম্ভব হয়।

## 16.4 : ডেম্প্‌ষ্টারের ভর বর্ণালীমাপক যন্ত্র

অ্যাষ্টনের পরে আরও অনেকে পরমাণবিক ভর সঠিকভাবে নির্ণয় করার জন্য বিবিধ প্রকার ভর বর্ণালীমাপক যন্ত্র উদ্ভাবিত করেছেন। এর মধ্যে ডেম্প্‌ষ্টার (A. J. Dempster) কর্তৃক উদ্ভাবিত যন্ত্রটি ঐতিহাসিক দিক থেকে বিশেষ গুরুত্বপূর্ণ। ১৯১৮ সালে নির্মিত এই যন্ত্রটির সরল নক্‌শা (16·3) চিত্রে প্রদর্শিত হয়েছে। P আয়ন উৎসের মধ্যে উৎপন্ন ধনাত্মক

চিত্র 16·3

ডেম্প্‌ষ্টারের ভর বর্ণালীমাপক যন্ত্র। P আয়ন উৎসকে একটি রেখা হিসাবে দেখান হয়েছে।

আয়নসমূহ সব সমপরিমাণ শক্তি অর্জন করে $S_1$ রেখাছিদ্রের মধ্য দিয়ে ভর বর্ণালীমাপকের চৌম্বক ক্ষেত্রের মধ্যে প্রবেশ করে। চৌম্বক ক্ষেত্র $H$ পুস্তকের পাতার অভিলম্বে ক্রিয়া করে। চৌম্বক ক্ষেত্রের প্রভাবে একই $\varepsilon/M$ সম্পন্ন আয়নগুচ্ছ নির্দিষ্ট অর্ধবৃত্তাকার পথ পরিভ্রমণ করে $S_2$ রেখাছিদ্রের ঠিক পিছনে অবস্থিত A সংগ্রাহকের (Collector) উপরে আপতিত হয়। সংগ্রাহকটি E ইলেকট্রোমিটারের সংগে সংযুক্ত থাকে। নির্দিষ্ট চৌম্বক ক্ষেত্রের প্রভাবে যখন আয়নগুচ্ছ সংগ্রাহকের উপরে আপতিত হয়, তখন

ইলেকট্রমিটারে তড়িৎপ্রবাহ নির্দেশিত হয়। সমগ্র যন্ত্রটির মধ্যে বায়ুচাপ খুব নিম্নমানে রাখা হয়।

যদি P এবং $S_1$ রেখাছিদ্রের মধ্যে $V$ বিভব প্রভেদ প্রযুক্ত থাকে, তাহলে ε আধান এবং $M$ ভর সম্পন্ন আয়ন কর্তৃক অর্জিত শক্তি হয়

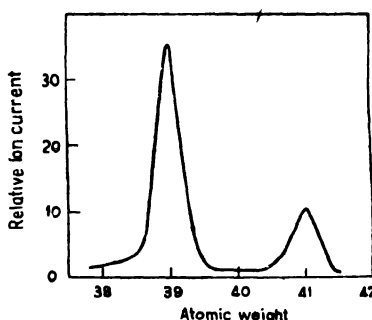
$$\varepsilon V = \tfrac{1}{2} M v^2$$

যদি আয়নগুলির ভ্রমণপথের ব্যাসার্ধ হয় $R$ তাহলে আমরা লিখতে পারি

$$\frac{H \varepsilon v}{c} = M v^2 / R$$

উপরের সমীকরণ দুটি থেকে সংগ্রাহকে আপতিত আয়নসমূহের $\varepsilon/M$ পাওয়া যায় ঃ

$$\varepsilon/M = \frac{2Vc^2}{H^2 R^2} \qquad (16{\cdot}19)$$

$V$ অথবা $H$ পরিবর্তিত করে বিভিন্ন $\varepsilon/M$ সম্পন্ন আয়নগুচ্ছকে সংগ্রাহক প্লেটের উপর ফোকাসিত করা যায়। বিভিন্ন প্রকার আয়নের জন্য

চিত্র 16·4

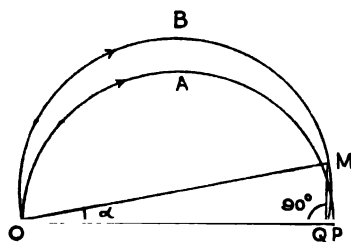
ডেম্প্‌স্টারের ভর বর্ণালীমাপক যন্ত্রের সাহায্যে প্রাপ্ত আয়ন প্রবাহ লেখচিত্র।

$V$ অথবা $H$ এর বিভিন্ন নির্দিষ্ট মানে এক একটি আয়ন প্রবাহশীর্ষ (Peak) উৎপন্ন হয় ( 16·4 চিত্র দ্রষ্টব্য )

ডেম্প্‌ষ্টারের যন্ত্রটি সঠিকভাবে পরমাণবিক ভর নির্ণয়ের কাজে বিশেষ উপযোগী নয়। অপরপক্ষে এই যন্ত্র বিভিন্ন আইসোটোপের আপেক্ষিক

প্রাচুর্য (Relative Abundance) নিরূপণের পক্ষে বিশেষ উপযোগী। এখানে উল্লেখযোগ্য যে আপেক্ষিক প্রাচুর্য নির্ণয়ের জন্য ভরবর্ণালীলেখ (Mass Spectrograph) অপেক্ষা ভর বর্ণালীমাপক (Mass Spectrometer) ব্যবহার করাই বেশী সুবিধাজনক। কারণ প্রথমোক্ত শ্রেণীর যন্ত্রে ফোটোগ্রাফিক পদ্ধতিতে আয়নগুলিকে নির্দেশ করা হয়। প্লেটের উপরে নির্দেশিত ভর-রেখাগুলির কৃষ্ণতার গাঢ়তা সঠিকভাবে পরিমাপ করতে পারলে তবেই আপেক্ষিক প্রাচুর্য নির্ণয় করা সম্ভব। প্রকৃতপক্ষে এই পরিমাপ আয়াসসাধ্য। অপরপক্ষে ভর বর্ণালীমাপক যন্ত্রে আয়ন প্রবাহ নির্দেশক মিটারের সাহায্যে এইরূপ পরিমাপ খুব সহজেই সঠিকভাবে করা যায়।

এখানে উল্লেখযোগ্য যে ডেম্প্‌স্টার উদ্ভাবিত ভর বর্ণালীমাপক যন্ত্রে $S_1$ রেখাছিদ্র থেকে অল্প কৌণিক বিস্তৃতি সহকারে নিঃসৃত সমপ্রকৃতির সমবেগ সম্পন্ন অপসারী (Divergent) আয়নগুচ্ছ চৌম্বক ক্ষেত্রের প্রভাবে $180°$ কোণে বিচ্যুত হবার পর $S_2$ রেখাছিদ্রের উপরে পুনর্ফোকাসিত হয়। অর্থাৎ চৌম্বক ক্ষেত্র যেন লেন্সের মত আয়নগুচ্ছকে ফোকাসিত করতে পারে।

চৌম্বক ক্ষেত্রের যে এই প্রকার ফোকাস ক্ষমতা আছে তা সহজেই প্রমাণ করা যায়। (16·5) চিত্রে $\alpha$ কোণে অপসারী দুটি সমবেগ সম্পন্ন আয়নের

চিত্র 16·5

চৌম্বক ক্ষেত্রের ফোকাস ক্ষমতা।

ভ্রমণপথ দেখান হয়েছে। OP সরলরেখার অভিলম্বে নিঃসৃত একটি আয়ন OAP অর্ধবৃত্তাকার পথ অতিক্রম করে OP রেখার P বিন্দুতে আপতিত হয়। অপরপক্ষে OP সরলরেখার সংগে $\alpha$ কোণে আনত OM সরল-রেখার অভিলম্বে নিঃসৃত আর একটি আয়ন OBMQ পথ পরিভ্রমণ

করে OP রেখার Q বিন্দুতে আপতিত হয়। যেহেতু OBM একটি অর্ধবৃত্ত, অতএব OQM একটি সমকোণ। যদি অর্ধবৃত্ত দুটির ব্যাসার্ধ হয় $R$, তাহলে আমরা লিখতে পারি

$$OQ=OM \cos \alpha=2R \cos \alpha$$
$$OP=2R$$

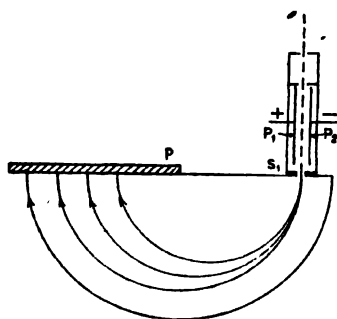
সুতরাং OP রেখার উপরে আয়ন দুটির আপতন বিন্দুদ্বয়ের ব্যবধান হয়

$$PQ=OP-OQ=2R(1-\cos \alpha)\approx R\alpha^2$$

যদি $\alpha$ কোণটি খুব ছোট হয়, তাহলে $\alpha^2$ সংখ্যাটি প্রায় উপেক্ষণীয় হয়। অর্থাৎ P এবং Q প্রায় একই বিন্দু বলে ধরা যায়। সুতরাং খুব ক্ষুদ্র কোণে অপসারী সমবেগ সম্পন্ন আয়নগুচ্ছ ফোটোগ্রাফিক প্লেটের উপরে একই বিন্দুতে পুনর্ফোকাসিত হয় বলে মনে করা যায়।

চৌম্বক ক্ষেত্রের আয়ন-ফোকাস ক্ষমতা শুধু যে 180° বিচ্যুতির ক্ষেত্রেই দেখা যায় তা নয়। বিচ্যুতির অন্যান্য মানেও অল্প পরিমাণে অপসারী সমবেগ সম্পন্ন আয়নগুচ্ছ চৌম্বক ক্ষেত্রের অপরদিকে নির্দিষ্ট বিন্দুতে ফোকাসিত হয়। চৌম্বক ক্ষেত্রের এইপ্রকার আয়ন ফোকাস ক্ষমতা ব্যবহার করে পরবর্তী যুগে নিয়ার (A.O. Nier) প্রমুখ বিজ্ঞানীগণ নানাপ্রকার ভর বর্ণালীমাপক যন্ত্র উদ্ভাবিত করেন।

### 16.5 : বেনব্রিজের ভর বর্ণালীলেখ যন্ত্র

ডেম্পস্টারের মত বেনব্রিজ (K. T. Bainbridge) একই $\varepsilon/M$ এবং

চিত্র 16·6

বেনব্রিজের ভর বর্ণালীলেখ যন্ত্র।

সমবেগ সম্পন্ন আয়নগুচ্ছকে চৌম্বক ক্ষেত্রের প্রভাবে 180° কোণে বিচ্যুত করে নির্দিষ্ট বিন্দুতে ফোকাসিত করার ব্যবস্থা করেন। তবে তাঁর যন্ত্রে আয়নগুলিকে একটি ফোটোগ্রাফিক প্লেটের উপরে ফোকাসিত করা হয়। ফলে উক্ত প্লেটের উপরে বিভিন্ন $\varepsilon/M$ সম্পন্ন আয়নগুচ্ছ কয়েকটি বিভিন্ন ভর-রেখা উৎপন্ন করে। তাছাড়া চৌম্বক ক্ষেত্রে প্রবেশ করার পূর্বে সমবেগ সম্পন্ন আয়নগুলিকে বেছে নেবার জন্য তিনি একটি বেগ-নির্বাচক ব্যবহার করেন।

বেনব্রিজ উদ্ভাবিত ভর বর্ণালীলেখ (Mass Spectrograph) যন্ত্রটি (16·6) চিত্রে প্রদর্শিত হয়েছে। উৎস থেকে নিঃসৃত সমান্তরিত (Collimated) আয়নগুচ্ছ প্রথমে $P_1$ এবং $P_2$ দুটি সমান্তরাল ধাতব প্লেটের অন্তর্বর্তী স্থানে প্রবেশ করে। প্লেটদ্বয়ের মধ্যে $X$ তড়িৎক্ষেত্র ক্রিয়া করে। (16·6) চিত্রে এই তড়িৎক্ষেত্র পুস্তকের পাতার সমান্তরালে আয়নগুচ্ছের প্রাথমিক গতির লম্বাভিমুখী দেখান হয়েছে। তা ছাড়া একটি চৌম্বক ক্ষেত্র $(H_1)$ পুস্তকের পাতার অভিলম্বে একই অঞ্চলে ক্রিয়া করে। ফলে চৌম্বক বিচ্যুতি এবং তাড়িত বিচ্যুতি একই সমতলে উৎপন্ন হয়। চৌম্বক ক্ষেত্রের দিক এবং মান নির্দিষ্ট করে আয়নের উপরে ক্রিয়াশীল চৌম্বক ও তাড়িত বলকে পরস্পরের বিপরীতমুখী এবং সমমান সম্পন্ন করা হয়। ফলে নির্দিষ্ট সমবেগ সম্পন্ন আয়নগুচ্ছ $P_1$ এবং $P_2$ প্লেটদ্বয়ের অন্তর্বর্তী স্থান থেকে অবিচ্যুত অবস্থায় নির্গত হতে পারে। এইভাবে নির্গত হতে পারবার শর্ত হচ্ছে

$$\frac{H_1 \varepsilon v}{c} = X\varepsilon$$

অর্থাৎ
$$v = cX/H_1 \tag{16.20}$$

উপরের আলোচনা থেকে দেখা যায় যে $X$ এবং $H_1$ এর নির্দিষ্ট মানে একটি মাত্র নির্দিষ্ট বেগ সম্পন্ন বিভিন্ন প্রকার আয়ন $P_1$ এবং $P_2$ প্লেটদ্বয়ের অন্তর্বর্তী স্থান থেকে বেরিয়ে আসতে পারে। বেনব্রিজ উদ্ভাবিত এই ব্যবস্থাকে বলা হয় আয়নের 'বেগ-নির্বাচক' (Velocity Selector)। $P_1$ এবং $P_2$ প্লেট দুটির ব্যবধান খুব কম রাখা হয়, যাতে অন্য কোন বেগ সম্পন্ন আয়ন এদের অন্তর্বর্তী স্থান থেকে বেরিয়ে আসতে না পারে।

বেগ-নির্বাচক থেকে নির্গত সমবেগ সম্পন্ন আয়নগুচ্ছ $S_1$ রেখাছিদ্র পার হয়ে ভর বর্ণালীলেখ যন্ত্রের $H$ চৌম্বক ক্ষেত্রের মধ্যে প্রবেশ করে।

বিভিন্ন $\varepsilon/M$ সম্পন্ন আয়নগুচ্ছ বিভিন্ন ব্যাসার্ধের অর্ধবৃত্তাকার পথ পরিভ্রমণ করে P ফোটোগ্রাফিক প্লেটের বিভিন্ন বিন্দুতে পুনর্ফোকাসিত হয়। যদি $R$ হয় পরিভ্রমণ পথের ব্যাসার্ধ তাহলে আমরা পাই

$$\frac{H\varepsilon v}{c} = \frac{Mv^2}{R}$$

অর্থাৎ
$$\varepsilon/Mc = v/HR \qquad (16{\cdot}21)$$

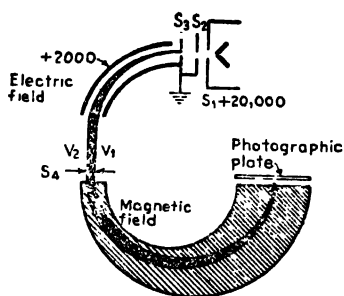
(16·20) সমীকরণের সাহায্যে আয়নের বেগ $v$ নির্ণয় করে (16·21) সমীকরণ থেকে $\varepsilon/M$ নিরূপণ করা যায়।

এই পদ্ধতি অবলম্বন করে বেনব্রিজ নানাবিধ আয়নের ভর সঠিক ভাবে নির্ণয় করেন। এখানে উল্লেখযোগ্য যে বিভিন্ন প্রকার আয়নের জন্য ফোটোগ্রাফিক প্লেটের উপরে উৎপন্ন ভর-রেখা সমূহের পারস্পরিক দূরত্ব ভরের সংগে একঘাতে পরিবর্তিত হয় ( $\because$ $R \propto M$)। সেদিক থেকে এই যন্ত্রটিকে অ্যাস্টনের ভর বর্ণালীলেখ যন্ত্র অপেক্ষা উন্নততর বলে মনে করা যেতে পারে। বেনব্রিজ তাঁর প্রথম যন্ত্রের সাহায্যে দশ সহস্রে একভাগ সঠিকতা সহকারে পরমাণবিক ভর নির্ণয় করেন।

## 16.6 : দুই প্রকার ফোকাস ক্ষমতা সম্পন্ন ভর বর্ণালীমাপক যন্ত্র

আমরা দেখেছি যে, অ্যাস্টনের যন্ত্রে খুব যত্ন সহকারে সমান্তরিত, কিন্তু অল্প বেগ-বিস্তৃতি সম্পন্ন সমপ্রকৃতির আয়নগুচ্ছ ফোটোগ্রাফিক প্লেটের একই বিন্দুতে ফোকাসিত হয়। অর্থাৎ এই যন্ত্রের বেগ-ফেকাস (Velocity Focusing) ধর্ম আছে। অপরপক্ষে ডেম্প্‌স্টার বা বেনব্রিজের যন্ত্রে সমবেগ সম্পন্ন অল্প পরিমাণে অপসারী আয়নগুচ্ছ একই বিন্দুতে ফোকাসিত হয়। এই যন্ত্রগুলির কৌণিক-ফোকাস বা দিক্‌-ফোকাস (Direction Focusing) ধর্ম আছে। পরবর্তী যুগে মাতাউখ্‌ এবং হার্ৎজগ (Mattauch and Hertzog), বেনব্রিজ এবং জর্ডান (Bainbridge and Jordan), নিয়ার (Nier) প্রমুখ বিজ্ঞানীগণ 'উভ-ফোকাস' ভর বর্ণালীবীক্ষণ যন্ত্র (Double Focusing Mass Spectroscope) উদ্ভাবিত করেন। এই সব যন্ত্রে কিছু পরিমাণ বেগ-বিস্তৃতি সম্পন্ন এবং অল্প কোণে অপসারী সমপ্রকৃতির আয়নগুচ্ছকে একই বিন্দুতে ফোকাসিত করা হয়। অর্থাৎ এই ধরনের যন্ত্রে বেগ-ফোকাস এবং দিক্‌-ফোকাস, দুই প্রকার ফোকাস ধর্মই আছে।

সাধারণতঃ বিভিন্ন বেগ সম্পন্ন অল্প পরিমাণে অপসারী আয়নগুচ্ছ প্রথমে একটি কৈন্দ্রিক (Radial) তড়িৎক্ষেত্রের মধ্যে প্রবেশ করে। দুটি সমান্তরাল বেলনাকৃতি ধাতব প্লেটের মধ্যে বিভব প্রভেদ প্রয়োগ করে এই প্রকার কৈন্দ্রিক তড়িৎক্ষেত্র উৎপন্ন করা হয়। এই তড়িৎক্ষেত্র একটি প্রিজ়মের মত কাজ করে। অর্থাৎ এর প্রভাবে বিভিন্ন বেগের আয়ন বিভিন্ন পথে ভ্রমণ করে, ফলে তাদের বেগ-বিচ্ছুরণ (Velocity Dispersion) ঘটে। ঠিক যেমন একটি প্রিজ়ম বিভিন্ন তরঙ্গদৈর্ঘ্যের আলোক বিচ্ছুরিত করে। সমান ভর কিন্তু বিভিন্ন বেগ সম্পন্ন অপসারী আয়নগুলি তড়িৎক্ষেত্র থেকে নিঃসৃত হবার পর বিভিন্ন বিন্দুতে ফোকাসিত হয়। তারপর তারা চৌম্বক ক্ষেত্রে প্রবেশ করে। লেন্‌সের মত চৌম্বক ক্ষেত্রের আয়ন ফোকাস ক্ষমতা আছে তা পূর্বেই বলা হয়েছে। তা ছাড়া চৌম্বক ক্ষেত্রের প্রভাবে আয়নগুলির ভর-বিচ্ছুরণও (Mass Dispersion) ঘটে। একই $\varepsilon/M$ বিশিষ্ট বিভিন্ন বেগ সম্পন্ন আয়নগুলি চৌম্বক ক্ষেত্রের প্রভাবে একই বিন্দুতে ফোকাসিত হয়।

(16·7) চিত্রে দুই প্রকার ফোকাস ধর্ম সম্পন্ন একটি যন্ত্র প্রদর্শিত হয়েছে। এইরূপ যন্ত্রের দুই প্রকার ফোকাস ধর্ম থাকার জন্য এর সাহায্যে

চিত্র 16·7

দুই প্রকার ফোকাস ধর্ম বিশিষ্ট ভর বর্ণালীলেখ যন্ত্র।

খুব নিম্ন তীব্রতা সম্পন্ন আয়নগুচ্ছ নিয়ে পরীক্ষা করা সম্ভব। তাছাড়া এইরূপ যন্ত্রের ভর বিশ্লেষণ ক্ষমতাও খুব উচ্চ হয়। তার ফলে এই ধরনের যন্ত্রের সাহায্যে অতি উচ্চ সঠিকতা (Accuracy) সহকারে পরমাণবিক

ভর নির্ণয় করা সম্ভব। বর্তমান কালে দশলক্ষে একভাগ $(1 : 10^6)$ সঠিকতা সহকারে পরমাণবিক ভর নির্ণয় করার যন্ত্র উদ্ভাবিত হয়েছে।

ভর বর্ণালীবীক্ষণ যন্ত্রসমূহ পদার্থবিদ্যা, রসায়ন, পেট্রোলিয়াম শিল্প প্রভৃতি নানা ক্ষেত্রে ব্যবহৃত হয়। পরমাণবিক ভর নির্ণয় ছাড়া, বিভিন্ন প্রাকৃতিক আইসোটোপের আপেক্ষিক প্রাচুর্য (Relative Abundance) নিরূপণ, নানাবিধ গ্যাসের মধ্যে অবস্থিত অপদ্রব্যের (Impurity) পরিমাণ নির্ণয়, গ্যাসের ব্যাপন হার (Rate of Diffusion) নির্ণয়, বায়ুশূন্য আধারের গাত্রে অতি ক্ষুদ্র ছিদ্রের (Leak) অবস্থান নির্ণয়, পেট্রোলিয়াম শিল্পে হাইড্রোকার্বন বিশ্লেষণ প্রভৃতি নানাবিধ গবেষণার কার্যে এবং ব্যবহারিক প্রয়োজনে ভর বর্ণালীবীক্ষণ যন্ত্রের ব্যবহার বর্তমান কালে অপরিহার্য হয়ে দাঁড়িয়েছে।

## 16.7 ভর-ত্রুটি, সমাবেশ-ভগ্নাংশ এবং কেন্দ্রকীয় বন্ধন শক্তি

খুব সঠিক ভাবে বিভিন্ন পরমাণুর ভর পরিমাপ করার পর অ্যাষ্টন লক্ষ্য করেন যে পরমাণবিক ভরের এককে পরিমিত এই সব ভরের মান প্রায় এক একটি পূর্ণ সংখ্যার সমান হয়। ইতিপূর্বে উল্লেখ করা হয়েছে যে $O^{16}$ আইসোটোপের পরমাণবিক ভরের ষোল ভাগের এক ভাগকে পরমাণবিক ভরের একক বলে ধরা হয়। ( সাম্প্রতিক কালে এই এককের পরিবর্তে $C^{12}$ আইসোটোপের পরমাণবিক ভরের বার ভাগের এক ভাগকে পরমাণবিক ভরের একক হিসাবে গ্রহণ করা হয়েছে।) স্পষ্টতঃ এই এককে $O^{16}$ আইসোটোপের পরমাণবিক ভর ঠিক 16 হবে। অ্যাষ্টন এবং পরবর্তীযুগে অন্যান্য বিজ্ঞানীগণ দ্বারা পরিমিত বিভিন্ন ভর যদিও পূর্ণ সংখ্যার খুব কাছাকাছি পাওয়া যায়, প্রকৃতপক্ষে কিন্তু $O^{16}$ ছাড়া অন্য সমস্ত ক্ষেত্রে পরমাণবিক ভর পূর্ণ সংখ্যা থেকে অল্প পরিমাণে পৃথক হয়। খুব হালকা $(A < 20)$ এবং খুব ভারী $(A > 180)$ স্থায়ী পরমাণু সমূহের ক্ষেত্রে পরমাণবিক ভর পূর্ণ সংখ্যা অপেক্ষা অল্প পরিমাণে বেশী হয়। অপরপক্ষে এদের অন্তর্বর্তী পরমাণুগুলির ভর পূর্ণ সংখ্যা অপেক্ষা অল্প পরিমাণে কম হয়।

নিকটতম পূর্ণ সংখ্যা থেকে পরমাণবিক ভর সমূহের এই অল্প পরিমাণ পার্থক্য খুবই তাৎপর্যপূর্ণ। অ্যাষ্টন এই পার্থক্যের নাম দেন 'ভর-ত্রুটি' (Mass Defect)। উদাহরণস্বরূপ $He^4$ এর পরমাণবিক ভর হচ্ছে $4{\cdot}003874\ amu$ ; সুতরাং এক্ষেত্রে ভর-ত্রুটির পরিমাণ $+{\cdot}003874\ amu$ হয়। আবার $As^{75}$ এর পরমাণবিক ভর হচ্ছে $74{\cdot}94540\ amu$ ;

সুতরাং এক্ষেত্রে ভর-ত্রুটির পরিমাণ $-\cdot05460\ amu$ হয়। অর্থাৎ ভর-ত্রুটি ধনাত্মক বা ঋণাত্মক দুইই হতে পারে। খুব হাল্কা এবং খুব ভারী পরমাণু সমূহের ক্ষেত্রে ভর-ত্রুটি ধনাত্মক হয় ; আর এদের অন্তর্বর্তী পরমাণুগুলির ক্ষেত্রে ভর-ত্রুটি ঋণাত্মক হয়। (16·1) সারণীতে কয়েকটি বিশেষ বিশেষ পরমাণুর ভর-ত্রুটি লিপিবদ্ধ করা হয়েছে।

**সারণী 16·1**

| পরমাণু | পরমাণবিক ভর ($amu$) | ভর-ত্রুটি | সমাবেশ ভগ্নাংশ |
|---|---|---|---|
| $H^1$ | 1·008145 | +0·008145 | +0·008145 |
| $H^2$ | 2·01474 | +0·01474 | +0·00737 |
| $He^4$ | 4·003874 | +0·003874 | +0·000968 |
| $C^{12}$ | 12·003803 | +0·003803 | +0·000317 |
| $O^{16}$ | 16·000000 | 0 | 0 |
| $P^{31}$ | 30·98356 | −0·01644 | −0·00053 |
| $Co^{59}$ | 58·95190 | −0·04810 | −0·000815 |
| $As^{75}$ | 74·94540 | −0·05460 | −0·000728 |
| $I^{127}$ | 126·9448 | −0·0552 | −0·00043 |
| $Au^{197}$ | 197·028 | +0·028 | +0·00014 |
| $Ra^{226}$ | 226·09600 | +0·09600 | +0·00042 |
| $U^{238}$ | 238·12522 | +0·12522 | +0·00053 |

যে কোন পরমাণুর ভর-ত্রুটিকে পরমাণুর ভর-সংখ্যা (Mass Number) দ্বারা ভাগ করলে পাওয়া যায় 'সমাবেশ-ভগ্নাংশ' (Packing Fraction)। উপরে প্রদত্ত (16·1) সারণীতে সর্বশেষ স্তম্ভে বিভিন্ন পরমাণুর সমাবেশ-ভগ্নাংশ লিপিবদ্ধ করা হয়েছে। স্পষ্টতঃ ভর-ত্রুটি এবং সমাবেশ-ভগ্নাংশের চিহ্ন একই হবে। এখানে উল্লেখযোগ্য যে পরমাণবিক ভরের নিকটতম পূর্ণ সংখ্যাই হচ্ছে যে কোন পরমাণুর ভর-সংখ্যা। এই সংখ্যা পরমাণু কেন্দ্রকের মধ্যে বর্তমান মোট প্রোটন-নিউট্রন সংখ্যার সমান হয়। সুতরাং যদি $A$ ভর-সংখ্যা বিশিষ্ট পরমাণুর পরমাণবিক ভর হয় $M$, তাহলে এর ভর-ত্রুটি (Mass Defect) হয়

$$\Delta M = M - A \qquad (16·22)$$

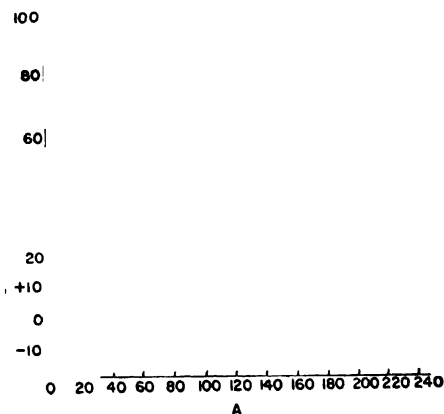
অতএব উক্ত পরমাণুর সমাবেশ-ভগ্নাংশ হয়

$$f=\frac{\Delta M}{A}=\frac{M-A}{A}=\frac{M}{A}-1 \qquad (16\cdot23)$$

অর্থাৎ কেন্দ্রকে বর্তমান কণিকা প্রতি ভর-ত্রুটিই হচ্ছে সমাবেশ-ভগ্নাংশ। সমীকরণ (16·23) থেকে আমরা পাই

$$M=A\ (1+f) \qquad (16\cdot24)$$

(16·8) চিত্রে বিভিন্ন পরমাণুর ক্ষেত্রে ভর-সংখ্যার সংগে সমাবেশ-ভগ্নাংশ পরিবর্তনের লেখচিত্র প্রদর্শিত হয়েছে। এই চিত্র থেকে প্রতীয়মান হয় যে খুব

100
80
60
20
+10
0
−10
0 20 40 60 80 100 120 140 160 180 200 220 240
A

চিত্র 16·8

সমাবেশ-ভগ্নাংশ লেখচিত্র।

হাল্কা পরমাণুর ক্ষেত্রে ($A < 20$), সমাবেশ-ভগ্নাংশ ধনাত্মক হয় এবং ভর-সংখ্যা বৃদ্ধির সংগে দ্রুত হ্রাস পেতে থাকে। 20 থেকে 180 এই সীমার মধ্যে অবস্থিত ভর-সংখ্যার ক্ষেত্রে সমাবেশ-ভগ্নাংশ ঋণাত্মক হয় এবং এর মান খুব কম হয়। লেখচিত্র থেকে দেখা যায় যে $A \simeq 60$ অঞ্চলে সমাবেশ-ভগ্নাংশের মান ন্যূনতম হয়। ভর-সংখ্যার মান খুব উচ্চ ($A > 180$) হলে, সমাবেশ-ভগ্নাংশ আবার ধনাত্মক হয় এবং ধীরে ধীরে বৃদ্ধি পেতে থাকে।

সমাবেশ ভগ্নাংশের এই প্রকার পরিবর্তনের কারণ খুঁজে পাওয়া যায় পরমাণু কেন্দ্রকের বন্ধন শক্তি (Binding Energy) বিবেচনা করলে।

আমরা পূর্বে দেখেছি যে পরমাণু কেন্দ্রক $Z$ সংখ্যক প্রোটন এবং $N=A-Z$ সংখ্যক নিউট্রনের সমাবেশে গঠিত। যে কোন কেন্দ্রকের ভর এর মধ্যস্থিত প্রোটন-নিউট্রনের মোট ভর অপেক্ষা কিছুটা কম হয়। কারণ প্রোটন এবং নিউট্রনগুলির সমাবেশের ফলে তাদের মধ্যে যে বন্ধনের সৃষ্টি হয় সেজন্য কিছু পরিমাণ বন্ধন শক্তির প্রয়োজন হয়। এই বন্ধন শক্তি হচ্ছে কেন্দ্রকে অবস্থিত প্রোটন-নিউট্রনের মোট ভর এবং কেন্দ্রকের ভরের পার্থক্যের যে সমতুল শক্তি আপেক্ষিকতাবাদ অনুযায়ী পাওয়া যায় তার সমান। যদি $M\ (A, Z)$ হয় কোন পরমাণুর পরমাণবিক ভর এবং $M_{\text{H}}=1{\cdot}008145$ *amu* ও $M_n=1{\cdot}008986$ *amu* হয় যথাক্রমে $\text{H}^1$ পরমাণুর এবং নিউট্রনের ভর, তাহলে কেন্দ্রকের বন্ধন শক্তি হয়

$$E_{\text{B}}=\{ZM_{\text{H}}+NM_n-M(A,Z)\}c^2 \qquad (16{\cdot}25)$$

উদাহরণস্বরূপ $\text{He}^4$ পরমাণুর কেন্দ্রকে দুটি প্রোটন $(Z=2)$ এবং দুটি নিউট্রন $(N=2)$ থাকে। এদের মোট পরমাণবিক ভর হচ্ছে

$$\begin{aligned}2M_H+2M_n&=2\times1{\cdot}008145+2\times1{\cdot}008986\\&=4{\cdot}034262\ amu\end{aligned}$$

এই ভর (16·1) সারণীতে লিপিবদ্ধ $\text{He}^4$ পরমাণুর ভর $M(\text{He}^4)=4{\cdot}003874$ *amu* অপেক্ষা বেশী। সুতরাং $\text{He}^4$ কেন্দ্রকের বন্ধন শক্তি হচ্ছে

$$\begin{aligned}E_{\text{B}}(\text{He}^4)&=4{\cdot}034262-4{\cdot}003874=0{\cdot}030388\ amu\\&=0{\cdot}030388\times931{\cdot}2=28{\cdot}3\ \text{মি-ই-ভো}\end{aligned}$$

$\text{He}^4$ কেন্দ্রকটিকে বিখণ্ডিত করে যদি এর মধ্যেকার প্রোটন এবং নিউট্রনগুলিকে সম্পূর্ণ বিচ্ছিন্ন করতে হয়, তাহলে কেন্দ্রকটিকে ন্যূনতম উপরোক্ত পরিমাণ শক্তি সরবরাহ করতে হবে। এর থেকে বন্ধন শক্তির তাৎপর্য হৃদয়ংগম করা যায়।

এখানে উল্লেখযোগ্য যে (16·25) সমীকরণে কেন্দ্রকীয় ভরের পরিবর্তে পরমাণবিক ভর ব্যবহার করা হয়েছে। এর কারণ হচ্ছে যে উক্ত সমীকরণে $Z$ সংখ্যক ইলেকট্রনের ভর বাতিল (Cancelled) হয়ে যায়।

যদি লেখা যায়

$$M_H = 1 + f_H$$
$$M_n = 1 + f_n$$

তাহলে (16·25) সমীকরণের দুইদিকের রাশিগুলিকে ( শক্তি এবং ভর ) একই এককে প্রকাশ করে, আমরা লিখতে পারি

$$\begin{aligned} E_B &= Z(1+f_{\mathrm{H}}) + N(1+f_n) - M(A, \mathrm{Z}) \\ &= (Z+N) + Zf_H + Nf_n - A - \Delta M \\ &= Zf_{\mathrm{H}} + Nf_n - \Delta M \qquad (16{\cdot}26) \end{aligned}$$

(16·26) সমীকরণ থেকে দেখা যায় যে ভর-ত্রুটি এবং কেন্দ্রকীয় বন্ধন শক্তির মধ্যে একটা নির্দিষ্ট সম্পর্ক আছে। বন্ধন শক্তিকে ভর-সংখ্যা $A$ দ্বারা ভাগ করলে বন্ধন-ভগ্নাংশ (Binding Fraction) $f_B$ পাওয়া যায় ঃ

$$f_{\mathrm{B}} = E_{\mathrm{B}}/A \qquad (16{\cdot}27)$$

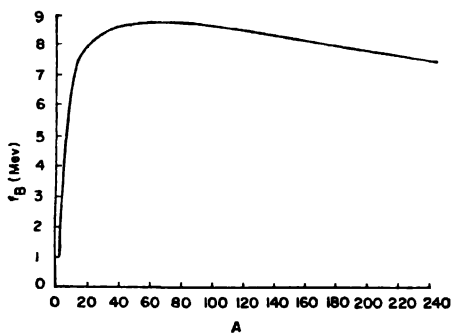
স্পষ্টতঃ বন্ধন-ভগ্নাংশ হচ্ছে কেন্দ্রকীয় কণিকা প্রতি বন্ধন শক্তির পরিমাণ। (16·26) সমীকরণ থেকে আমরা পাই

$$f_B = \frac{E_B}{A} = \frac{Zf_{\mathrm{H}} + Nf_n}{A} - \frac{\Delta M}{A}$$

বেশীর ভাগ হালকা পরমাণুর ক্ষেত্রে ($A < 40$), $Z \simeq N$ হয়। অন্যান্য ক্ষেত্রেও $Z$ এবং $N$ সমমাত্রিক হয়। সুতরাং আমরা মোটামুটি ভাবে লিখতে পারি $Z \simeq N \simeq A/2$, এবং

$$f_B \simeq \frac{f_H + f_n}{2} - f \qquad (16{\cdot}28)$$

যেহেতু $f_H = 0{\cdot}008145\ amu$ এবং $f_n = 0{\cdot}008986\ amu$ সংখ্যা দুটি ধ্রুবক, অতএব সমীকরণ (16·27) থেকে দেখা যায় যে সমাবেশ-ভগ্নাংশ হ্রাস বা বৃদ্ধির সংগে বন্ধন-ভগ্নাংশ যথাক্রমে বৃদ্ধি বা হ্রাস পায়। বস্তুতঃ ভর-সংখ্যার সংগে বন্ধন-ভগ্নাশের পরিবর্তন সমাবেশ-ভগ্নাংশ পরিবর্তনের ঠিক বিপরীত প্রকৃতির হয়। (16·9) চিত্রে এই পরিবর্তনের লেখচিত্র প্রদর্শিত হয়েছে। লেখচিত্র থেকে দেখা যায় যে খুব হালকা পরমাণুর

ক্ষেত্রে $f_B$ নিম্নমান থেকে দ্রুত বৃদ্ধি পায়। মধ্যবর্তী অঞ্চলে ($20 < A < 180$) প্রায় ধ্রুবক হয়ে যায়। ভারী পরমাণুর ক্ষেত্রে $f_B$ ধীরে ধীরে হ্রাস পায়।

চিত্র 16·9

বন্ধন-ভগ্নাংশ লেখচিত্র।

স্পষ্টতঃ কেন্দ্রকের বন্ধন-ভগ্নাংশ $f_B$ যত উচ্চ হয়, তার বন্ধনও তত দৃঢ়তর হয়। সুতরাং সমাবেশ-ভগ্নাংশ যত নিম্ন হয়, কেন্দ্রকের বন্ধনও তত বেশী দৃঢ় হয়। (16·1) সারণী থেকে দেখা যায় যে ডয়টেরনের ($H^2$) সমাবেশ-ভগ্নাংশের মান ($+0·00737$) বেশ উচ্চ। অর্থাৎ ডয়টেরনের বন্ধন অপেক্ষাকৃত অনেক কম দৃঢ় হয়। বস্তুতঃ এই কেন্দ্রকের বন্ধন শক্তি হয়

$$E_B\,(H^2) = (1·008145 + 1·008986 - 2·01476) \times 931·2$$
$$= 2·226 \text{ মি-ই-ভো}$$

অর্থাৎ ডয়টেরনের বন্ধন-ভগ্নাংশ হয় মাত্র

$$f_B(H^2) = 1·113 \text{ মি-ই-ভো/কণিকা}$$

অপরপক্ষে $He^4$ কেন্দ্রক অনেক বেশী দৃঢ় সংবদ্ধ হয়। ইতিপূর্বে আমরা দেখেছি যে এর মোট বন্ধন শক্তি হচ্ছে 28·3 মি-ই-ভো। সুতরাং এর বন্ধন-ভগ্নাংশ হচ্ছে

$$f_B(He^4) = \frac{28·3}{4} = 7·08 \text{ মি-ই-ভো/কণিকা}$$

$H^2$ কেন্দ্রকের বন্ধন-ভগ্নাংশের তুলনায় এই সংখ্যা অনেক উচ্চতর। (16·1) সারণী থেকে দেখা যায় যে $He^4$ এর সমাবেশ-ভগ্নাংশ $+0·000968$

*amu* ডয়টেরনের সমাবেশ-ভগ্নাংশের তুলনায় অনেক কম। মধ্যবর্তী অঞ্চলে অবস্থিত ($20 < A < 180$) যে সব কেন্দ্রকের সমাবেশ-ভগ্নাংশ ঋণাত্মক হয়, সেইগুলি সর্বাপেক্ষা বেশী দৃঢ় সংবদ্ধ হয়। (16·9) চিত্র থেকে দেখা যায় এদের ক্ষেত্রে বন্ধন-ভগ্নাংশের মান হয় প্রায় 8·5 মি-ই-ভো/কণিকা। যেহেতু আরও গুরুভার কেন্দ্রকগুলির বন্ধন-ভগ্নাংশ কমে যায় এবং এদের সমাবেশ-ভগ্নাংশ ধনাত্মক হয় অতএব এদের বন্ধন অপেক্ষাকৃত শিথিলতর হয়। ইউরেনিয়ামের ক্ষেত্রে বন্ধন-ভগ্নাংশ কমে গিয়ে হয় প্রায় 7·5 মি-ই-ভো/কণিকা।

## 16.8 : সমাবেশ-ভগ্নাংশ লেখচিত্রের উপযোগিতা

সমাবেশ-ভগ্নাংশ বা বন্ধন-ভগ্নাংশ লেখচিত্রের সাহায্যে কেন্দ্রকের স্বতঃস্ফূর্ত $\alpha$-রূপান্তরের কারণ সহজেই ব্যাখ্যা করা যায়। (16·9) চিত্র থেকে দেখা যায় খুব ভারী কেন্দ্রকগুলির ক্ষেত্রে ভর-সংখ্যা বৃদ্ধির সংগে বন্ধন-ভগ্নাংশ $f_B$ হ্রাস পায়। যদি এইরূপ একটি কেন্দ্রক ( যথা $U^{238}$ ) একটি $\alpha$-কণিকা নিঃসৃত করে, তাহলে অবশিষ্ট কেন্দ্রকের ভর-সংখ্যা চার একক কমে যায় ; ফলে এর বন্ধন-ভগ্নাংশ $f_B$ অল্প বৃদ্ধি পায়। অর্থাৎ অবশিষ্ট কেন্দ্রক অপেক্ষাকৃত বেশী দৃঢ় সংবদ্ধ হয়। প্রাকৃতিক নিয়মানুযায়ী কেন্দ্রকগুলি সব সময় অপেক্ষাকৃত দৃঢ়তর ভাবে সংবদ্ধ অবস্থায় রূপান্তরিত হতে চায়। কারণ সেক্ষেত্রে তাদের মোট শক্তির পরিমাণ কমে যায়। সুতরাং যে সব কেন্দ্রকের $\alpha$-বিঘটনের ফলে সৃষ্ট কেন্দ্রকটির বন্ধন-ভগ্নাংশ অপেক্ষাকৃত উচ্চতর হয়, সেগুলি প্রাকৃতিক ধর্ম অনুযায়ী $\alpha$-কণিকা নিঃসৃত করে রূপান্তরিত হতে চায়। (16.9) চিত্র থেকে দেখা যায় যে $A > 100$ সম্পন্ন কেন্দ্রকের ক্ষেত্রে এইরূপ ঘটতে পারে। প্রকৃতপক্ষে অবশ্য কেবল খুব ভারী কেন্দ্রকগুলির ক্ষেত্রেই $\alpha$-কণিকার শক্তি কেন্দ্রক থেকে নিঃসৃত হবার পক্ষে যথেষ্ট হয়। অন্য ক্ষেত্রে এই শক্তির মান এত কম হয় যে $\alpha$-কণিকাগুলির পক্ষে বিভব প্রতিবন্ধক (Potential Barrier) ভেদ করে নিঃসৃত হবার সম্ভাবনা উপেক্ষণীয় হয় (12·15 অনুচ্ছেদ দ্রষ্টব্য )।

(16·25) এবং (16·27) সমীকরণদ্বয়ের সাহায্যে $\alpha$-বিঘটন শক্তি নির্ধারক (12·9) সমীকরণকে রূপান্তরিত করা যায় ঃ

যেহেতু $M(A,Z) = ZM_H + NM_n - Af_B\,(A,Z)$

$$M(A-4,\, Z-2) = (Z-2)M_H + (N-2)M_n - (A-4)f'_B\,(A-4,\, Z-2)$$

$$M(\mathrm{He}^4) = 2M_H + 2M_n - 4f_{B\alpha}$$

অতএব আমরা পাই

$$Q_\alpha = M(A,Z) - M(A-4, Z-2) - M\,(\text{He}^4)$$
$$= A(f'_B - f_B) + 4(f_{B\alpha} - f'_B) \qquad (16{\cdot}29)$$

(16·29) সমীকরণের ডান দিকের দ্বিতীয় পদটি প্রথমটির তুলনায় উপেক্ষণীয় হয়। সুতরাং $Q_\alpha \approx A(f'_B - f_B)$ লেখা যায়। যেহেতু ভারী কেন্দ্রক সমূহের ক্ষেত্রে $f'_B > f_B$ হয়, অতএব $Q_\alpha$ এদের ক্ষেত্রে ধনাত্মক হয়; অর্থাৎ এই সব কেন্দ্রক $\alpha$-বিঘটনশীল হতে পারে।

সমাবেশ-ভগ্নাংশ বা বন্ধন-ভগ্নাংশ লেখচিত্রের সাহায্যে কেন্দ্রক-বিভাজন (Nuclear Fission), কেন্দ্রক-সংযোজন (Nuclear Fusion) প্রভৃতি সংঘটনের ব্যাখ্যা সহজেই পাওয়া যায়।

### 16.9 : কেন্দ্রক গঠন সম্বন্ধীয় প্রোটন-ইলেকট্রন মতবাদ এবং এর অসম্পূর্ণতা

ভর বর্ণালীলেখ যন্ত্রের সাহায্যে পরমাণবিক ভর নির্ণয় করে বিভিন্ন আইসোটোপের পরমাণবিক ভর প্রায় এক একটি পূর্ণ সংখ্যার সমান পাওয়া যায়, একথা পূর্বে উল্লেখ করা হয়েছে। এই তথ্যকে অনেক সময় অ্যাষ্টনের 'পূর্ণ সংখ্যা সূত্র' (Whole Number Rule) বলা হয়।

রসায়নবিদ্‌গণ কর্তৃক নির্ণীত পরমাণবিক ভারও অনেক ক্ষেত্রে প্রায় এক একটি পূর্ণ সংখ্যার সমান হয়। এই তথ্যের উপর ভিত্তি করে গত শতাব্দীর প্রথম দিকে প্রাউট (Prout) নামক বিজ্ঞানী প্রস্তাব করেন যে যেহেতু হাইড্রোজেনের পরমাণবিক ভার প্রায় একের সমান, অতএব সমস্ত মৌলের পরমাণুই বিভিন্ন সংখ্যক হাইড্রোজেন পরমাণুর দ্বারা গঠিত। কিন্তু যখন দেখা যায় যে ক্লোরিন ($A = 35{\cdot}46$), তামা ($A = 63{\cdot}54$) প্রভৃতি মৌলের ক্ষেত্রে পরমাণবিক ভার পূর্ণ সংখ্যা থেকে যথেষ্ট পরিমাণে পৃথক হয়, তখন প্রাউটের অনুমান (Prout's Hypothesis) পরিত্যক্ত হয়। বর্তমান শতাব্দীতে অ্যাষ্টনের পূর্ণ সংখ্যা সূত্র আবিষ্কারের পর বিজ্ঞানীগণ আবার নূতন করে চিন্তা করতে শুরু করলেন যে প্রাউটের উপরোক্ত মতবাদের সত্যই কোন ভিত্তি আছে কী না। আমরা পূর্বে দেখেছি যে রসায়নবিদ্‌গণ কর্তৃক নিরূপিত পরমাণবিক ভার প্রকৃতপক্ষে মৌলের বিভিন্ন আইসোটোপের গড় পরমাণবিক ভারের সমান হয় (2·9 অনুচ্ছেদ দ্রষ্টব্য)। আইসোটোপগুলির নিজস্ব পরমাণবিক ভর অবশ্য সব সময়েই প্রায় এক একটি পূর্ণ সংখ্যার সমান হয়।

যেহেতু $H^1$ আইসোটোপের পরমাণবিক ভর (1·008145) প্রায় একের সমান হয়, সুতরাং একথা মনে হওয়া স্বাভাবিক যে $A$ ভর-সংখ্যা সম্পন্ন কোন আইসোটোপের পরমাণু কেন্দ্রকের মধ্যে $A$ সংখ্যক $H^1$ পরমাণু কেন্দ্রক বা প্রোটন থাকে। এদের প্রত্যেকটি এক ইলেকট্রনীয় একক পরিমাণ ধনাত্মক আধান বহন করে। সুতরাং $A$ সংখ্যক প্রোটনের মোট আধান $A$ ইলেকট্রনীয় আধানের সমান হবে। কিন্তু প্রকৃতপক্ষে ইলেকট্রনীয় আধানের এককে পরিমিত কেন্দ্রকীয় আধান পরমাণবিক সংখ্যা $Z$ এর সমান হয়। বেশীর ভাগ পরমাণুর ক্ষেত্রেই পরমাণবিক সংখ্যা $Z$ ভর-সংখ্যা $A$ অপেক্ষা কম হয় ; সাধারণতঃ $Z$ এর মান $A/2$ বা আরও কম হয়। সুতরাং পরমাণু কেন্দ্রক কেবল $A$ সংখ্যক প্রোটন দ্বারা গঠিত, এই অনুমানের মধ্যে একটা গুরুতর অসংগতি থেকে যায়।

এই অসংগতি দূর করার জন্য প্রথমে অনুমান করা হয় যে কেন্দ্রকের মধ্যে $A$ সংখ্যক ধনাত্মক আধানবাহী প্রোটন ছাড়া $(A-Z)$ সংখ্যক ঋণাত্মক আধানবাহী ইলেকট্রনও থাকে ; যার ফলে কেন্দ্রকটি মোট $Z$ ইলেকট্রনীয় একক পরিমাণ ধনাত্মক আধান বহন করে। যেহেতু ইলেকট্রনগুলির ভর প্রোটনগুলির ভরের তুলনায় খুবই সামান্য হয়, সুতরাং কেন্দ্রকের মোট ভর $A$ সংখ্যক প্রোটনের ভরের কাছাকাছি হয়।

উপরোক্ত প্রোটন-ইলেকট্রন মতবাদের (Proton Electron Hypothesis) কিন্তু অনেক ত্রুটি আছে। নানারূপ সূক্ষ্ম যুক্তির দ্বারা দেখান যায় যে পরমাণু কেন্দ্রকের মধ্যে ইলেকট্রনের অবস্থান সম্ভব নয়। কেন্দ্রকের ব্যাস সাধারণতঃ $10^{-12}$ সেমি অপেক্ষা কম হয়। হাইজেনবার্গের অনিশ্চয়তাবাদ (Uncertainty Principle) অনুযায়ী এত ক্ষুদ্র গণ্ডির মধ্যে আবদ্ধ যে কোন কণিকার ভরবেগের অনিশ্চয়তার মান হয় প্রায়

$$\Delta p=\frac{h}{2\pi.\Delta x}\sim 1{\cdot}0\times 10^{-15} \text{ গ্রাম-সেমি/সেকেণ্ড}$$

এইরূপ ভরবেগ সম্পন্ন একটি ইলেকট্রনের গতিশক্তির পরিমাণ প্রায় 20 মি-ই-ভো হয়। কোন কেন্দ্রকের মধ্যে এত উচ্চ শক্তি সম্পন্ন ইলেকট্রনের অস্তিত্বের কোনরূপ নিদর্শন পাওয়া যায় না। তেজস্ক্রিয় কেন্দ্রক নিঃসৃত $\beta$-কণিকার ক্ষেত্রে উচ্চতম পরিমিত শক্তি মাত্র কয়েক মি-ই-ভো পরিমাণ হতে দেখা যায়। সুতরাং পরমাণু কেন্দ্রকের মধ্যে ইলেকট্রন অবস্থান করতে

পারে বলে মনে হয় না। $\beta$-বিঘটনের সময়ে ইলেকট্রনটি কেন্দ্রকের মধ্যে মুহূর্তের জন্য সৃষ্ট হয় মাত্র ( 13·6 অনুচ্ছেদ দ্রষ্টব্য )।

আবার কেন্দ্রকের কৌণিক ভরবেগ বিবেচনা করলেও দেখা যায় যে প্রোটন-ইলেকট্রন মতবাদ ঠিক হতে পারে না। প্রোটন এবং ইলেকট্রন উভয় প্রকার কণিকারই ঘূর্ণন কৌণিক ভরবেগের (Spin Angular Momentum) মান $\frac{1}{2}\frac{h}{2\pi}$ হয়। কেন্দ্রকে প্রোটন-ইলেকট্রনের মোট সংখ্যা $(A+A-Z)$ বা $(2A-Z)$ হওয়া উচিত। যদি এই সংখ্যাটি জোড় হয়, তাহলে কেন্দ্রকের মোট কৌণিক ভরবেগ $h/2\pi$ সংখ্যাটির পূর্ণ গুণিতক (Integral Multiple) হবে ; আর এই সংখ্যাটি বিজোড় হলে মোট কৌণিক ভরবেগ $h/2\pi$ এর অর্ধপূর্ণ গুণিতক (Half Intergral Multiple) হবে।

উদাহরণস্বরূপ $N^{14}$ আইসোটোপের ক্ষেত্রে $A=14$ এবং $Z=7$ হয়। এর কেন্দ্রকে প্রোটন এবং ইলেকট্রনের সংখ্যা যথাক্রমে 14 এবং 7 হওয়া উচিত। অর্থাৎ এই কেন্দ্রক মধ্যস্থ কণিকাগুলির মোট সংখ্যা 21 হওয়া উচিত। সুতরাং এই কেন্দ্রকটির কৌণিক ভরবেগ একটি অর্ধপূর্ণ সংখ্যা হওয়া উচিত। কিন্তু প্রকৃতপক্ষে দেখা যায় যে $N^{14}$ কেন্দ্রকের কৌণিক ভরবেগ $I=1$ হয়। বস্তুতঃ পরীক্ষার দ্বারা দেখা যায় যে কোন কেন্দ্রকের ভর-সংখ্যা $A$ যদি জোড় হয়, তাহলে এর কৌণিক ভরবেগ একটি পূর্ণ সংখ্যা হয়, আর $A$ যদি বিজোড় হয় তাহলে কৌণিক ভরবেগ একটি অর্ধপূর্ণ সংখ্যা হয়। সুতরাং পরমাণু কেন্দ্রক যে কতকগুলি প্রোটন এবং ইলেকট্রন দ্বারা গঠিত এই অনুমান ঠিক হতে পারে না।

এছাড়া কেন্দ্রকের চৌম্বক ভ্রামকের (Magnetic Moment) মান এবং কেন্দ্রকের ক্ষেত্রে প্রযোজ্য সংখ্যায়ন (Statistics) বিবেচনা করলেও দেখা যায় যে প্রোটন-ইলেকট্রন মতবাদ ঠিক হতে পারে না।

### 16.10 : কেন্দ্রকের গঠন সম্বন্ধীয় আধুনিক তত্ত্ব ; প্রোটন-নিউট্রন মতবাদ

কেন্দ্রকের গঠন সম্বন্ধীয় প্রোটন-ইলেকট্রন মতবাদের অসুবিধার কথা বিবেচনা করে রাদারফোর্ড ১৯২০ সালে প্রস্তাব করেন যে খুব সম্ভবতঃ কেন্দ্রকের মধ্যে প্রোটন এবং ইলেকট্রনগুলি পরস্পরের সংগে মিলিত হয়ে এক

একটি আধানহীন কণিকার সৃষ্টি করে। ১৯৩২ সালে রাদারফোর্ডের সুযোগ্য ছাত্র চ্যাড্‌উইক কেন্দ্রক রূপান্তর সম্পর্কিত পরীক্ষা করবার সময় কোন কোন ক্ষেত্রে কেন্দ্রক থেকে এক প্রকার আধানহীন কণিকা নিঃসৃত হতে দেখেন। এই কণিকাগুলির ভর প্রোটনের ভরের প্রায় সমান হয়। এদের নাম দেওয়া হয় 'নিউট্রন'। চ্যাড্‌উইকের এই যুগান্তরকারী পরীক্ষার বর্ণনা (17·6) অনুচ্ছেদে দেওয়া হবে।

চ্যাড্‌উইকের আবিষ্কারের পরে স্বভাবতঃই বিজ্ঞানীগণ অনুমান করেন যে পরমাণু কেন্দ্রক কতকগুলি প্রোটন এবং নিউট্রনের ঘন সন্নিবেশে গঠিত হয়। $Z$ পরমাণবিক সংখ্যা এবং $A$ ভর-সংখ্যা সম্পন্ন কেন্দ্রকের মধ্যে $Z$ সংখ্যক ধনাত্মক আধানবাহী প্রোটন এবং $(A-Z)$ সংখ্যক আধানহীন নিউট্রন থাকে ; অর্থাৎ কেন্দ্রকের মধ্যে বর্তমান কণিকাগুলির মোট সংখ্যা এর ভর-সংখ্যার সমান হয়। যেহেতু প্রোটন এবং নিউট্রনগুলির ভর পরস্পরের প্রায় সমান হয় এবং একের কাছাকাছি হয়, অতএব পরমাণুর ভর এর ভর-সংখ্যার খুব কাছাকাছি হয়। এইভাবে অ্যাষ্টনের পূর্ণ সংখ্যা সূত্রের ব্যাখ্যা করা যায়। স্পষ্টতঃ এইভাবে গঠিত কেন্দ্রক $Z$ ইলেকট্রনীয় একক পরিমাণ ধনাত্মক আধান বহন করে।

প্রোটন-নিউট্রন মতবাদের সাহায্যে কেন্দ্রকের কৌণিক ভরবেগ, চৌম্বক ভ্রামক (Magnetic Moment) এবং কেন্দ্রক কর্তৃক মান্য সংখ্যায়নও (Statistics) ব্যাখ্যা করা যায়। যেহেতু কেন্দ্রকের মধ্যে মোট $A$ সংখ্যক প্রোটন এবং নিউট্রন থাকে, এবং এদের প্রত্যেকটির ঘূর্ণন কৌণিক ভরবেগ (Spin Angular Momentum) $\frac{1}{2}\frac{h}{2\pi}$ হয়, সুতরাং $A$ সংখ্যাটি জোড় হলে কেন্দ্রকের মোট কৌণিক ভরবেগ $h/2\pi$ এর পূর্ণ গুণিতক এবং বিজোড় হলে কৌণিক ভরবেগ $h/2\pi$ এর অর্ধপূর্ণ গুণিতক হবে। উদাহরণস্বরূপ $N^{14}$ কেন্দ্রকে মোট চৌদ্দটি ( জোড় সংখ্যক ) প্রোটন এবং নিউট্রন ( সাতটি প্রোটন ও সাতটি নিউট্রন ) থাকে। সুতরাং এর মোট কৌণিক ভরবেগ পূর্ণ সংখ্যা হওয়া উচিত। আমরা দেখেছি যে প্রকৃতপক্ষে এই রকমই হয়ে থাকে।

এখানে উল্লেখযোগ্য যে নিউট্রন কণিকাটি প্রোটন বা ইলেকট্রনের মত একটি মৌলিক কণিকা (Fundamental Particle)। কেন্দ্রকের মধ্যে প্রোটন এবং ইলেকট্রনের মিলনের ফলে নিউট্রন সৃষ্ট হয়, রাদারফোর্ডের এই

মতবাদ বর্তমানে পদার্থবিদ্‌গণ সত্য বলে মনে করেন না। নিউট্রনের ভর প্রোটনের ভর অপেক্ষা সামান্য বেশী হয়। এই কণিকাটি কেন্দ্রকের বাইরে মুক্ত অবস্থায় থাকা কালে তেজস্ক্রিয় হয়, একথা (13·6) অনুচ্ছেদে উল্লেখ করা হয়েছে। মুক্ত অবস্থায় এর অর্ধজীবনকাল (Half Life) 12·8 মিনিট হয় এবং 0·782 মি-ই-ভো উচ্চতম শক্তি সম্পন্ন $\beta$-কণিকা নিঃসৃত করে এটি প্রোটনে রূপান্তরিত হয়।

প্রোটন এবং নিউট্রনগুলিকে সম্মিলিত ভাবে বর্তমানে নিউক্লীয়ন (Nucleon) আখ্যা দেওয়া হয়। অধুনা প্রচলিত ধারণা অনুযায়ী প্রোটন এবং নিউট্রন একই কেন্দ্রকীয় কণিকা নিউক্লীয়নের দুটি ভিন্ন রূপ। প্রথমটি হচ্ছে এর আধানবাহী রূপ, দ্বিতীয়টি হচ্ছে এর আধানহীন রূপ। অর্থাৎ কেবল আধানের পার্থক্য ছাড়া এদের মধ্যে আর কোন পার্থক্য নাই।

প্রোটন-নিউট্রন মতবাদের সাহায্যে বিভিন্ন মৌলের একাধিক আইসোটোপের অস্তিত্ব সহজেই ব্যাখ্যা করা যায় (11·3 অনুচ্ছেদ দ্রষ্টব্য)। মৌলের রাসায়নিক প্রকৃতি নিরূপিত হয় তার পরমাণু কেন্দ্রকে বর্তমান প্রোটন সংখ্যার দ্বারা। যদি প্রোটন সংখ্যা একই হয় কিন্তু নিউট্রন সংখ্যা পৃথক হয়, তাহলে মৌলের রাসায়নিক প্রকৃতি অপরিবর্তিত থাকলেও এর ভর-সংখ্যা $A$ এবং পরমাণবিক ভর $M$ পৃথক হবে। এদেরই বলা হয় আইসোটোপ।

## 16.11 : কেন্দ্রকীয় আকর্ষণী বলের প্রকৃতি

প্রশ্ন উঠতে পারে যে কেন্দ্রকের মধ্যে প্রোটন এবং নিউট্রনগুলি পরস্পরের সংগে দৃঢ়ভাবে সংবদ্ধ থাকার কারণ কী? আমরা জানি প্রোটনগুলি ধনাত্মক আধানবাহী। সুতরাং এদের মধ্যে কুলম্ব জাতীয় বিকর্ষণী বল ক্রিয়া করে। আবার নিউট্রনগুলি আধানহীন। সুতরাং এদের নিজেদের মধ্যে কুলম্ব জাতীয় (অর্থাৎ বৈদ্যুতিক) কোনরূপ বল ক্রিয়া করতে পারে না। তাছাড়া প্রোটন এবং নিউট্রনের মধ্যেও কুলম্ব জাতীয় কোনরূপ বল ক্রিয়া করতে পারে না। কেন্দ্রকের মধ্যে নিউট্রন-প্রোটনগুলির সুদৃঢ় বন্ধন মহাকর্ষজ (Gravitation) বলের জন্যও হতে পারে না। কারণ কেন্দ্রকের অভ্যন্তরে নিউক্লীয়ন-গুলির মধ্যে ক্রিয়াশীল মহাকর্ষজ বলের মান খুবই কম হয়। সুতরাং কেন্দ্রকের দৃঢ় সংবদ্ধতা ব্যাখা করার জন্য অন্য প্রকার কেন্দ্রকীয় আকর্ষণী বলের কল্পনা করতে হয়। নিউক্লীয়নগুলির মধ্যেকার পারস্পরিক দূরত্ব খুব কম থাকলে তবেই এই বল ক্রিয়াশীল হয় এবং অত্যন্ত প্রখর হয়। এদের পারস্পরিক ব্যবধান

একটা বিশেষ দূরত্বসীমা (Range) অপেক্ষা বেশী হলে এই বলের মান প্রায় উপেক্ষণীয় হয়ে যায়। অর্থাৎ কেন্দ্রকের নিউট্রন প্রোটনগুলির মধ্যে এক প্রকার অত্যন্ত প্রখর নিম্ন দূরত্বসীমা (Short Range) সম্পন্ন আকর্ষণী বল ক্রিয়া করে। ইউকাওয়া (H. Yukawa) নামক জাপানী বিজ্ঞানী সর্বপ্রথম ১৯৩৫ সালে এই বলের প্রকৃতি সম্বন্ধে একটি গাণিতিক তত্ত্ব উদ্ভাবিত করেন। সেইজন্য এই প্রকার বলকে সাধারণতঃ ইউকাওয়া বল আখ্যা দেওয়া হয়।

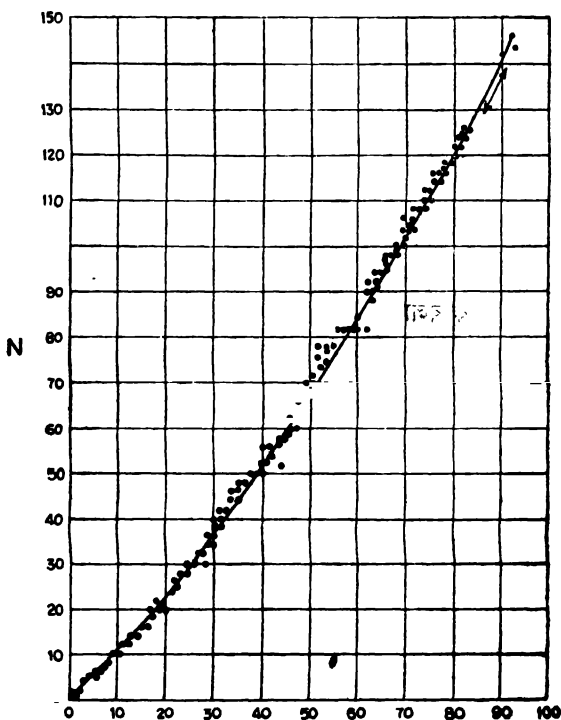
ইউকাওয়ার কল্পনা অনুযায়ী কেন্দ্রকের ভিতরে খুব অল্প দূরত্বের মধ্যে অবস্থান কালে ($r < 2 \times 10^{-13}$ সেমি) নিউক্লীয়নগুলি পরস্পরের মধ্যে ইলেকট্রন এবং প্রোটনের ভরের মাঝামাঝি ভর সম্পন্ন এক প্রকার কণিকা আদান-প্রদান (Exchange) করে; যার ফলে নিউক্লীয়নগুলির মধ্যে একটি অত্যন্ত প্রখর আকর্ষণী বল ক্রিয়া করে। ইউকাওয়া যখন তাঁর তত্ত্ব প্রকাশিত করেন তখন এই প্রকার কোন কণিকার অস্তিত্বের কথা জানা ছিল না। এর কিছুদিনের মধ্যেই (১৯৩৭ সালে) মহাজাগতিক রশ্মির (Cosmic Rays) মধ্যে এইরূপ এক প্রকার কণিকা আবিষ্কৃত হয়। বর্তমানে এই কণিকাগুলিকে মেসন (Meson) নামে অভিহিত করা হয়। পরে (১৯৪৭ সালে) আরও এক প্রকার মেসন আবিষ্কৃত হয়। এই দ্বিতীয় শ্রেণীর মেসনের নাম হচ্ছে $\pi$-মেসন (Primary অর্থাৎ আদি মেসন)। প্রথম শ্রেণীর মেসনকে বলা হয় $\mu$-মেসন।

বর্তমানে প্রচলিত ধারণা অনুযায়ী $\pi$-মেসনগুলিই কেন্দ্রকীয় আকর্ষণী বলের জন্য দায়ী। ধনাত্মক এবং ঋণাত্মক দুই প্রকার আধানবাহী $\pi$-মেসনই দেখতে পাওয়া যায়। দুই ক্ষেত্রেই এদের আধানের পরিমাণ এক ইলেকট্রনীয় আধানের সমান। তাছাড়া আধানহীন $\pi^{\circ}$-মেসনও আবিষ্কৃত হয়েছে। $\mu$ এবং $\pi$-মেসনের আবিষ্কার এবং এদের ধর্মাবলী সম্বন্ধে (20·8—20·10) অনুচ্ছেদে বিস্তারিতভাবে আলোচনা করা হবে।

ইউকাওয়ার কল্পনা অনুযায়ী নিউক্লীয়নগুলি কেন্দ্রকের অভ্যন্তরে অবস্থান-কালে পরস্পরের মধ্যে আহিত বা আধানহীন $\pi$-মেসন বিনিময় করে। এর আগে হাইড্রোজেন অণুর মধ্যেকার পরমাণু দুটির পারস্পরিক আকর্ষণ ব্যাখ্যা করার জন্য এই প্রকার বিনিময়-বলের (Exchange Force) কল্পনা করা হয়। ইউকাওয়া তত্ত্ব সম্বন্ধে (20·10) অনুচ্ছেদে আলোচনা করা হবে। $\pi$-মেসন আবিষ্কারের পরে ইউকাওয়া তাঁর এই তত্ত্বের জন্য নোবেল পুরস্কার প্রাপ্ত হন।

## 16.12 : কেন্দ্রকের

বর্তমানে বিভিন্ন মৌলের প্রায় এক সহস্র আইসোটোপের অস্তিত্বের কথা জানা গেছে। এদের মধ্যে মাত্র শতকরা 25 ভাগ স্থায়ী (Stable) আইসোটোপ। বাকী সবই তেজস্ক্রিয় আইসোটোপ, যার বেশীর ভাগই কৃত্রিম উপায়ে কেন্দ্রক রূপান্তর দ্বারা উৎপন্ন করা হয়।

প্রাকৃতিক মৌলসমূহকে দুই শ্রেণীতে ভাগ করা যায়; প্রথম শ্রেণীর পরমাণবিক সংখ্যা $Z$ হচ্ছে জোড়, দ্বিতীয় শ্রেণীর ক্ষেত্রে $Z$ হচ্ছে বিজোড়। সাধারণতঃ জোড় $Z$ সম্পন্ন মৌলগুলির স্থায়ী আইসোটোপের সংখ্যা বিজোড়

চিত্র 16·10

স্থায়ী পরমাণুর ক্ষেত্রে $N$ এবং $Z$ এর লেখচিত্র।

$Z$ সম্পন্ন মৌলের তুলনায় অনেক বেশী হয়। শেষোক্ত ক্ষেত্রে স্থায়ী আইসোটোপের সংখ্যা মাত্র এক বা দুই হয়। প্রথম শ্রেণীর ক্ষেত্রে স্থায়ী আইসোটোপের সংখ্যা দশটি পর্যন্ত জানা আছে ; যথা ক্যালসিয়াম ($Z=20$) দস্তা ($Z=30$), জিরকোনিয়াম ($Z=40$) প্রভৃতির ক্ষেত্রে পাঁচটি, বেরিয়ামের ($Z=56$) ক্ষেত্রে ছয়টি, ক্যাডমিয়ামের ($Z=48$) ক্ষেত্রে আটটি, টিনের ($Z=50$) ক্ষেত্রে দশটি ইত্যাদি।

(16·10) চিত্রে বিভিন্ন মৌলের স্থায়ী আইসোটোপগুলির কেন্দ্রকে অবস্থিত ($N=A-Z$) নিউট্রন সংখ্যা এবং ($Z$) প্রোটন সংখ্যার লেখচিত্র প্রদর্শিত হয়েছে। এই লেখচিত্র থেকে দেখা যায় যে স্থায়ী আইসোটোপগুলির ক্ষেত্রে কেন্দ্রকে বর্তমান নিউট্রন-প্রোটন সংখ্যার অনুপাতের মান একটা সংকীর্ণ সীমার মধ্যে আবদ্ধ থাকে। ভর-সংখ্যা $A$ নিম্ন হলে নিউট্রন এবং প্রোটন সংখ্যা প্রায় সমান হয় ; অর্থাৎ $N/Z=1$ হয়। উচ্চ ভর-সংখ্যার ক্ষেত্রে নিউট্রনের সংখ্যা প্রোটনের সংখ্যা অপেক্ষা কিছু বেশী হয়। উচ্চতম $Z$ সম্পন্ন মৌলগুলির ক্ষেত্রে $N/Z$ অনুপাতটির মান 1·6 পর্যন্ত হয়।

(16·10) চিত্রে বিভিন্ন মৌলের আইসোটোপগুলি এক একটি উল্লম্ব (Vertical) রেখার উপরে অবস্থিত থাকে। অপর পক্ষে একই ভর-সংখ্যা কিন্তু বিভিন্ন পরমাণবিক সংখ্যা সম্পন্ন কেন্দ্রকগুলি এই লেখচিত্রে $Z$-অক্ষের সংগে $135^\circ$ কোণে বিন্যস্ত সমান্তরাল রেখাসমূহের উপরে অবস্থিত থাকে। এই ধরনের কেন্দ্রকগুলিকে বলা হয় 'আইসোবার' (Isobar)। সাধারণতঃ বিভিন্ন ভর-সংখ্যায় একটি বা দুটি করে স্থায়ী আইসোবার দেখতে পাওয়া যায়। $A=96$, 124, 130 এবং 136 ভর-সংখ্যার ক্ষেত্রে তিনটি করে স্থায়ী আইসোবার পাওয়া যায়।

*বিভিন্ন মৌলের আইসোটোপগুলিকে সাধারণতঃ চার শ্রেণীতে ভাগ করা* যায় ; প্রোটন সংখ্যা জোড়, নিউট্রন সংখ্যা জোড় ( জোড়-জোড় ) ; প্রোটন সংখ্যা জোড়, নিউট্রন সংখ্যা বিজোড় ( জোড়-বিজোড় ) ; প্রোটন সংখ্যা বিজোড়, নিউট্রন সংখ্যা জোড় ( বিজোড়-জোড় ) ; প্রোটন সংখ্যা বিজোড়, নিউট্রন সংখ্যা বিজোড় ( বিজোড়-বিজোড় )। স্থায়ী আইসোটোপ সমূহের মধ্যে জোড়-জোড় শ্রেণীভুক্ত কেন্দ্রকের সংখ্যা সর্বাধিক হয় এবং মোট সংখ্যার অর্ধেকেরও বেশী হয়। জোড়-বিজোড় এবং বিজোড়-জোড় শ্রেণীভুক্ত কেন্দ্রকের সংখ্যা প্রায় পরস্পরের সমান হয় এবং মোট সংখ্যার শতকরা কুড়ি

ভাগের মত হয়। সর্বাপেক্ষা কম দেখা যায় বিজোড়-বিজোড় শ্রেণীভুক্ত স্থায়ী কেন্দ্রক। সর্বাপেক্ষা হাল্‌কা পরমাণুগুলির মধ্যে $H^2$, $Li^6$, $B^{10}$ এবং $N^{14}$, মাত্র চারটি এই শ্রেণীর স্থায়ী কেন্দ্রক আছে।

অপেক্ষাকৃত নিম্ন $Z$ সম্পন্ন কেন্দ্রকগুলির মধ্যে নিউট্রন এবং প্রোটন সংখ্যার সমতা থেকে প্রতীয়মান হয় যে কেন্দ্রকের মধ্যে নিউট্রন-নিউট্রন এবং প্রোটন-প্রোটন আকর্ষণী বল পরস্পরের প্রায় সমান হয়। উচ্চতর $Z$ সম্পন্ন কেন্দ্রকসমূহের ক্ষেত্রে প্রোটনগুলির মধ্যেকার কুলম্ব বিকর্ষণী বল বেশ প্রবল হয়ে ওঠে। সেইজন্য এক্ষেত্রে নিউট্রন সংখ্যা অপেক্ষাকৃত বেশী হলেই তবে কেন্দ্রক মধ্যস্থ সব নিউক্লীয়নগুলি পরস্পরের সংগে দৃঢ় সংবদ্ধ হয়ে স্থায়ী কেন্দ্রকের সৃষ্টি করতে পারে। নির্দিষ্ট সংখ্যক নিউট্রন এবং প্রোটন থাকলেই তবে একটি কেন্দ্রক স্থায়ী হতে পারে। এদের মধ্যে যে কোনটির সংখ্যা কম বা বেশী হলে কেন্দ্রকের স্থায়িত্ব নষ্ট হয়। যদি প্রোটন সংখ্যা অপরিবর্তিত রেখে নিউট্রন সংখ্যা বাড়ান যায়, তাহলে নূতন কেন্দ্রকটি (16·10) চিত্রে প্রদর্শিত স্থায়িত্ব-রেখার (Stability Line) বাম দিকে চলে যায়। এইরূপ কেন্দ্রকের মধ্যে একটি নিউট্রন স্বতঃস্ফূর্ত ভাবে প্রোটনে রূপান্তরিত হয়ে যায় এবং কেন্দ্রকটি $\beta^-$ বিঘটনশীল হয়; $\beta^-$ কণিকা নিঃসরণের ফলে কেন্দ্রকটি স্থায়িত্ব-রেখার দিকে অপসৃত হয়। অপরপক্ষে কোন স্থায়ী কেন্দ্রকের $N$ অপরির্তিত রেখে যদি $Z$ বাড়ান যায় তাহলে নূতন কেন্দ্রকটি স্থায়িত্ব-রেখার ডান দিকে চলে যায়। এইরূপ কেন্দ্রক প্রোটন সংখ্যার আধিক্যের জন্য $\beta^+$ বিঘটনশীল বা ইলেকট্রন আহরক (Electron Capturing) হয়। এইরূপ কেন্দ্রকের একটি প্রোটন নিউট্রনে রূপান্তরিত হয় এবং কেন্দ্রকটি $\beta^+$ কণিকা নিঃসৃত করে বা কক্ষীয় ইলেকট্রন আহরণ করে স্থায়িত্ব-রেখার দিকে অপসৃত হয়।

এখানে উল্লেখযোগ্য যে $\beta$-বিঘটনের ফলে কেন্দ্রকের $Z$ এক একক পরিমাণে পরিবর্তিত হয়, $A$ অপরিবর্তিত থাকে। অর্থাৎ $\beta$-বিঘটন এক একটি আইসোবার রেখা ধরে সংঘটিত হয়। স্পষ্টতঃ এমন কোন দুটি স্থায়ী আইসোবার থাকতে পারে না যাদের মধ্যে $Z$ এর ব্যবধান মাত্র এক একক পরিমাণ হয়। কারণ ভরের পার্থক্যের জন্য এদের মধ্যে উচ্চতর পরমাণবিক ভর সম্পন্ন আইসোবারটি $\beta$-বিঘটনের দ্বারা অন্যটিতে রূপান্তরিত হয়ে যাবে। সেইজন্য একাধিক স্থায়ী আইসোবারের ক্ষেত্রে পরমাণবিক সংখ্যার পারস্পরিক পার্থক্য দুই একক হয়, যথা $A^{40}$ $(Z=18)$ ও $Ca^{40}$ $(Z=20)$।

## 16.13 : কেন্দ্রকীয় প্রতিরূপ

পরমাণু কেন্দ্রকের বিভিন্ন ধর্মাবলী ব্যাখ্যা করতে হলে কেন্দ্রকীয় কণিকাগুলির মধ্যে ক্রিয়াশীল বলের প্রকৃতি সঠিকভাবে বুঝতে হবে। দুটি নিউক্লীয়নের মধ্যে ক্রিয়াশীল আকর্ষণী বলের প্রকৃতি সম্বন্ধে আমরা ইতিপূর্বে আলোচনা করেছি। এই বলের প্রাবল্য এত বেশী এবং এর দূরত্বসীমা (Range) এত কম যে এই বলের সঠিক গাণিতিক সূত্র নির্ণয় করা কঠিন। ইউকাওয়া মেসন বিনিময় বিবেচনা করে এই বলের প্রকৃতি সম্বন্ধে একটি গাণিতিক সূত্র উদ্ভাবিত করেন। কিন্তু এই সূত্রই যে একমাত্র সঠিক সূত্র সে কথা নিশ্চিত ভাবে বলা শক্ত। বস্তুতঃ একাধিক গাণিতিক সূত্রের সাহায্যে নিউক্লীয়নগুলির মধ্যে ক্রিয়াশীল প্রখর এবং স্বল্প দূরত্বসীমা সম্পন্ন আকর্ষণী বলের স্বরূপ প্রকাশ করা যায়। এদের যে কোন একটি সূত্রের উপর ভিত্তি করে উদ্ভাবিত তত্ত্ব এবং বিভিন্ন প্রকার পরীক্ষালব্ধ (যথা নিউট্রন-প্রোটন বিক্ষেপ, ইত্যাদি) তথ্যাবলীর মধ্যে প্রায় একই ধরনের সংগতি বা অসংগতি পাওয়া যায়।

কেন্দ্রকের মধ্যে যখন অনেকগুলি নিউক্লীয়ন একত্রে একটা ক্ষুদ্র গণ্ডির মধ্যে আবদ্ধ থাকে, তখন তাদের মধ্যে ক্রিয়াশীল বলের প্রকৃতি সম্বন্ধে কোন গাণিতিক তত্ত্ব উদ্ভাবিত করতে গেলে যে কোন দুটি নিউক্লীয়নের মধ্যেকার কেন্দ্রকীয় আকর্ষণী বলের গাণিতিক প্রকৃতি জানা প্রয়োজন। অথচ উপরের আলোচনায় আমরা দেখেছি এ সম্বন্ধে আমাদের কোন সুস্পষ্ট এবং সঠিক ধারণা নাই। পরমাণুর কক্ষীয় ইলেকট্রনগুলির সঙ্গে তুলনা করলে আমরা দেখি যে শেষোক্ত ক্ষেত্রে আমাদের এইরূপ কোন অসুবিধা নাই। কারণ ইলেকট্রনগুলির নিজেদের মধ্যে এবং ইলেকট্রন ও কেন্দ্রকের মধ্যে ক্রিয়াশীল বলের (কুলম্ব বল) প্রকৃতি আমরা সঠিক ভাবে জানি। সুতরাং এক্ষেত্রে সঠিক গাণিতিক তত্ত্ব উদ্ভাবিত করা সম্ভব। কেন্দ্রকের ক্ষেত্রে উপরে আলোচিত অসুবিধার জন্য কেন্দ্রক সম্বন্ধীয় তত্ত্বসমূহ অনেক সময় কতকগুলি বিশেষ ধরনের প্রতিরূপের (Models) উপর ভিত্তি করে উদ্ভাবিত করা হয়। এইসব প্রতিরূপের মধ্যে 'তরল বিন্দু প্রতিরূপ' (Liquid Drop Model) এবং 'খোলস প্রতিরূপ' (Shell Model) বিশেষভাবে উল্লেখযোগ্য।

## 16.14 : তরল বিন্দু প্রতিরূপ ; বেথে-ভাইসৎজ্যাকার ভর সূত্র

এই প্রতিরূপ অনুযায়ী যথেষ্ট সংখ্যক প্রোটন ও নিউট্রন দ্বারা গঠিত পরমাণু কেন্দ্রককে তরল বিন্দু সদৃশ বলে কল্পনা করা হয়। তরল বিন্দুর

ভিতরে যে কোন একটি অণু নির্দিষ্ট সংখ্যক অণুর উপরে তার আকর্ষণী বলের প্রভাব বিস্তার করে, এইরূপ মনে করার কারণ আছে। অর্থাৎ প্রতিটি অণু অন্য সমস্ত অণুর উপরে তাদের আকর্ষণী প্রভাব বিস্তার করে না। এই অবস্থায় আমরা বলে থাকি যে আকর্ষণী বল সম্পৃক্ততা (Saturation) লাভ করে। যদি এই আকর্ষণী বল জনিত আণবিক স্থিতিশক্তি নির্ণয় করতে হয়, তাহলে প্রথমেই দেখতে হবে যে পরস্পরের সঙ্গে বিক্রিয়াশীল কতগুলি আণবিক যুগল বিন্দুটির মধ্যে আছে। যদি প্রতিটি অণু অন্য সব অণুর সঙ্গে বিক্রিয়া করে এবং বিন্দুটির মধ্যে মোট $N$ সংখ্যক অণু থাকে, তাহলে মোট বিক্রিয়াশীল আণবিক যুগলের সংখ্যা হয় $\frac{1}{2}N(N-1) \simeq N^2/2$ ( $\because$ $N$ একটি বৃহৎ সংখ্যা)। সুতরাং আণবিক স্থিতিশক্তির $N^2$ সংখ্যাটির সমানুপাতিক হওয়া উচিত। অপরপক্ষে যদি প্রতিটি অণু নির্দিষ্ট সীমিত সংখ্যক অণুর সংগে বিক্রিয়া করে, তাহলে মোট বিক্রিয়াশীল আণবিক যুগলের সংখ্যা $N$ এর সংগে একঘাতে (Linearly) পরিবর্তনশীল হয়, এবং সেক্ষেত্রে বিন্দুর স্থিতিশক্তিও $N$ এর সমানুপাতিক হবে। পরীক্ষা দ্বারা এই শেষোক্ত সিদ্ধান্তের সমর্থন পাওয়া যায়। যথা কোন তরল বিন্দুকে বাষ্পীভূত করতে প্রয়োজনীয় তাপশক্তি অর্থাৎ লীনতাপ (Latent Heat) বিন্দুটির মধ্যেকার অণুগুলির মোট সংখ্যার সমানুপাতিক হয়; এক গ্রাম তরল বাষ্পীভূত করতে যে পরিমাণ তাপ শক্তির প্রয়োজন হয়, দুই গ্রাম তরলের ক্ষেত্রে তার দ্বিগুণ তাপের প্রয়োজন হয়।

কেন্দ্রকের বন্ধন শক্তি (Binding Energy) পরিমাপ করলে দেখা যায় যে এই শক্তি কেন্দ্রকের মধ্যে বর্তমান মোট নিউক্লীয়ন সংখ্যার অর্থাৎ ভর-সংখ্যার সমানুপাতিক। কারণ আমরা (16·7) অনুচ্ছেদে দেখেছি যে নিউক্লীয়ন প্রতি কেন্দ্রকীয় বন্ধন শক্তির মান বেশীর ভাগ কেন্দ্রকের ক্ষেত্রে প্রায় সমান হয় (8·5 মি-ই-ভো)। তাছাড়া, যেহেতু কেন্দ্রকের ব্যাসার্ধ $R \propto A^{\frac{1}{3}}$ হয়, সুতরাং কেন্দ্রকের আয়তনও কেন্দ্রকে বর্তমান মোট নিউক্লীয়ন সংখ্যার সমানুপাতিক হয়। এই দুটি তথ্য বিবেচনা করলে তরল বিন্দুর সঙ্গে কেন্দ্রকের সাদৃশ্য বুঝতে পারা যায়। সুতরাং উপরের আলোচনার ভিত্তিতে আমরা অনুমান করিতে পারি যে কেন্দ্রকের ভিতরে নিউক্লীয়নগুলির মধ্যে ক্রিয়াশীল বলেরও একটা সম্পৃক্ততা (Saturation) থাকে। এই সম্পৃক্ততার ফলে যে কোন একটি নিউক্লীয়ন কেন্দ্রকের মধ্যে একটা সীমিত সংখ্যক নিউক্লীয়নকে আকর্ষণ করতে পারে।

উপরে প্রদত্ত আলোচনার ভিত্তিতে নিউক্লীয়নগুলির পারস্পরিক আকর্ষণের প্রকৃতি সম্বন্ধে কোনরূপ বিচার না করেও আমরা কেন্দ্রকীয় বন্ধন শক্তি, তথা কেন্দ্রকের ভর সম্বন্ধে কিছুটা অনুভূতিমূলকভাবে (Empirically) একটি গাণিতিক সূত্র উদ্ভাবিত করতে পারি। যদি $Z$ পরমাণবিক সংখ্যা এবং $A$ ভর-সংখ্যা সম্পন্ন কোন কেন্দ্রকের পরমাণবিক ভর হয় $M\ (A, Z)$ এবং এর বন্ধন শক্তি হয় $E_B$, তাহলে আমরা লিখতে পারি

$$M(A, Z) = ZM_H + NM_n - E_B \qquad (16{\cdot}30)$$

এখানে $N = A - Z$ হচ্ছে কেন্দ্রকের নিউট্রন সংখ্যা। $M_H$ এবং $M_n$ হচ্ছে যথাক্রমে $H^1$ আইসোটোপের এবং নিউট্রনের পরমাণবিক ভর।

আমরা দেখেছি যে বন্ধন-শক্তি $E_B$ মোট নিউক্লীয়ন সংখ্যার সমানুপাতিক। অর্থাৎ $E_B$ নির্ধারক গাণিতিক ফর্ম্‌লার প্রথম পদটি $a_1 A$ লেখা যেতে পারে ; এখানে $a_1$ হচ্ছে একটি ধ্রুবক।

এখন যেহেতু কেন্দ্রকটি একটি তরল বিন্দু সদৃশ বলে কল্পনা করা হয়, সেইজন্য তরল বিন্দুর উপরিতলস্থ অণুগুলির মত কেন্দ্রকের উপরিতলস্থ নিউক্লীয়নগুলির উপরে পৃষ্ঠটানের (Surface Tension) অনুরূপ এক প্রকার বল ক্রিয়াশীল বলে কল্পনা করা যায়। এই নিউক্লীয়নগুলি কেবল কেন্দ্রকের ভিতর দিকের নিউক্লীয়নগুলির দ্বারা আকৃষ্ট হয়, বাইরের দিকে কোন আকর্ষণ অনুভব করে না। ফলে তরল বিন্দুর মত কেন্দ্রকটিও গোলকের আকার প্রাপ্ত হয়। যদি গোলকের ব্যাসার্ধ $R$ হয়, তাহলে এর উপরিতলের ক্ষেত্রফল $R^2$ এর সমানুপাতিক হয়। পৃষ্ঠটানের ফলে কেন্দ্রকের বন্ধন শক্তি কিছুটা কমে যায়, যার পরিমাণ এর উপরিতলের ক্ষেত্রফলের সমানুপাতিক হয়। যেহেতু $R \propto A^{\frac{1}{3}}$, অতএব পৃষ্ঠটান জনিত বন্ধন শক্তির এই হ্রাসের মান $a_2 A^{\frac{2}{3}}$ হয় ; এখানে $a_2$ হচ্ছে একটি ধ্রুবক।

কেন্দ্রকীয় বন্ধন শক্তি হ্রাসের আর একটা কারণ হচ্ছে প্রোটনগুলির মধ্যেকার কুলম্ব বিকর্ষণী বল। যেহেতু এই বল যে কোন দূরত্বে ক্রিয়া করতে পারে, প্রতিটি প্রোটন অন্য সবগুলি প্রোটনের সংগে বিক্রিয়া করে। কেন্দ্রকের মধ্যে মোট প্রোটন-যুগলের সংখ্যা $\frac{1}{2}Z(Z-1) \simeq Z^2/2$ হয় ; এই সমস্ত প্রোটন-যুগলের কুলম্ব শক্তি নির্ণয় করলে দেখা যায় যে কুলম্ব বিকর্ষণী বলের প্রভাবে কেন্দ্রকের বন্ধন শক্তি হ্রাসের মান হয় $a_3 Z^2/A^{\frac{1}{3}}$ ; এখানে $a_3$ একটি ধ্রুবক।

আমরা পূর্বে দেখেছি যে কেন্দ্রকের মধ্যে নিউট্রন-নিউট্রন এবং প্রোটন-প্রোটন বলের মান সমান হয়। সেজন্য কেন্দ্রকের মধ্যে নিউট্রন এবং প্রোটন সংখ্যা সমান হওয়া উচিত। কিন্তু অনেক ক্ষেত্রে তা হয় না। এর ফলে কেন্দ্রকের বন্ধন শক্তি কিছুটা কমে যায়। এই হ্রাসের মান নির্ভর করে নিউট্রন-প্রোটন সংখ্যার পার্থক্যের উপরে। যেহেতু এই পার্থক্য হচ্ছে $N-Z \doteq A-2Z$, অতএব আলোচ্য হ্রাসের মান $a_4(A-2Z)^2/A$ হয় ; এখানে $a_4$ একটি ধ্রুবক।

পরিশেষে কেন্দ্রকের মধ্যেকার নিউক্লীয়নগুলির ঘূর্ণন কৌণিক ভরবেগের (Spin Angular Momentum) জন্য কেন্দ্রকের বন্ধনশক্তি কিছুটা প্রভাবিত হয়। এর ফলে বন্ধন শক্তির সংগে আর একটি পদ $\delta$ যোগ করতে হয়। এটিকে বলা হয় যুগল-শক্তি (Pairing Energy) পদ। এই পদটি ধনাত্মক (জোড়-জোড় কেন্দ্রকের ক্ষেত্রে), ঋণাত্মক (বিজোড়-বিজোড় ক্ষেত্রে) বা শূন্য (জোড়-বিজোড় বা বিজোড়-জোড় ক্ষেত্রে) হতে পারে। সুতরাং পরিশেষে আমরা কেন্দ্রকের বন্ধন শক্তি পাই

$$E_B = a_1A - a_2A^{\frac{2}{3}} - a_3Z^2/A^{\frac{1}{3}} - a_4\frac{(A-2Z)^2}{A} + \delta \qquad (16{\cdot}31)$$

(16·30) ও (16·31) সমীকরণ থেকে কেন্দ্রকের ভর পাওয়া যায়

$$M(A,Z) = ZM_H + NM_n - a_1A + a_2A^{\frac{2}{3}} + a_3Z^2/A^{\frac{1}{3}} + a_4\frac{(A-2Z)^2}{A} - \delta \qquad (16{\cdot}32)$$

(16·32) সমীকরণকে বেথে-ভাইস্ৎজ্যাকার ভর-সূত্র (Bethe Weis-zäcker Mass Formula) আখ্যা দেওয়া হয়। বিভিন্ন আইসোটোপের পরিমিত ভর থেকে $a_1$, $a_2$, $a_3$ এবং $a_4$ ধ্রুবকগুলির মান নির্ণয় করা যায়। পরমাণবিক ভরের এককে এদের মান হচ্ছে ঃ

$$a_1 = 0{\cdot}01504\ amu\ ;\ a_2 = 0{\cdot}014\ amu\ ;$$
$$a_3 = 0{\cdot}000627\ amu\ ;\ a_4 = 0{\cdot}0208\ amu. \qquad (16{\cdot}33)$$

$\delta$ পদটির মান হচ্ছে

$$\delta = 0{\cdot}036A^{\frac{3}{4}}\ amu \qquad (16{\cdot}34)$$

(16·32) সমীকরণের সাহায্যে প্রাপ্ত কেন্দ্রকীয় ভর এবং বন্ধন শক্তির সংগে

পরীক্ষার দ্বারা পরিমিত ভর এবং বন্ধন শক্তির যথেষ্ট সংগতি পাওয়া যায়।

তরল বিন্দু প্রতিরূপের সাহায্যে আইসোবারের স্থায়িত্ব, কেন্দ্রক-বিভাজন (Nuclear Fission) প্রভৃতি সংঘটন ব্যাখ্যা করা যায়।

## 16.15 : খোলস-প্রতিরূপ ; ম্যাজিক সংখ্যা

কোন বিশেষ প্রতিরূপের সাহায্যে কেন্দ্রকের সব রকম ধর্মাবলীর বা কেন্দ্রকীয় প্রক্রিয়া সমূহের ব্যাখ্যা সম্ভব হয় না। তরল বিন্দু প্রতিরূপের সাহায্যে কেন্দ্রকের ভর, বন্ধন শক্তি, বিভাজন প্রভৃতি ব্যাখ্যা করা যায়। কিন্তু আরও অনেক প্রকার কেন্দ্রকীয় ধর্মাবলী বা প্রক্রিয়া আছে যা এই প্রতিরূপের সাহায্যে ব্যাখ্যা করা যায় না। কেন্দ্রকের এমন কতকগুলি ধর্মের কথা জানা আছে যা ব্যাখ্যা করার জন্য পরমাণুর বহিরঞ্চলের ইলেকট্রনীয় খোলসের মত কেন্দ্রকের মধ্যেও কতকগুলি প্রোটন ও নিউট্রন খোলস (Shell) আছে বলে কল্পনা করা হয়।

আমরা জানি যে পরমাণুর বহিস্থ ইলেকট্রনগুলি K, L, M, N,··· প্রভৃতি কতকগুলি নির্দিষ্ট খোলসে অবস্থিত থেকে আবর্তন করে। প্রত্যেক খোলসে কতকগুলি নির্দিষ্ট উচ্চতম সংখ্যক ইলেকট্রন থাকতে পারে। যখন একটি খোলস ইলেকট্রন দ্বারা পূর্ণ হয়ে যায়, তখন শেষ ইলেকট্রনটির বন্ধন শক্তি ( আয়নন শক্তি ) সর্বোচ্চ হয়। উদাসী গ্যাসের (Inert Gas) ক্ষেত্রে এইরূপ হয়ে থাকে। কোন খোলস পূর্ণ করার জন্য প্রয়োজনীয় সংখ্যা অপেক্ষা একটি বেশী বা কম ইলেকট্রন থাকলে বন্ধন শক্তি কম হয়। বিশেষতঃ একটি বেশী ইলেকট্রন সম্পন্ন ক্ষারীয় (Alkali) ধাতুসমূহের ( যথা Li, Na, K,···ইত্যাদির ) সংযোজী (Valence) ইলেকট্রন খুব শিথিল ভাবে সংবদ্ধ থাকে। ( 5·4 অনুচ্ছেদ দ্রষ্টব্য )

কেন্দ্রক সমূহের বন্ধন শক্তি বিবেচনা করলে দেখা যায় যে যখন একটি কেন্দ্রকের মধ্যে 2, 8, 20, 28, 50, 82 বা 126 সংখ্যক প্রোটন বা নিউট্রন থাকে তখন উক্ত কেন্দ্রকটি বিশেষ দৃঢ়ভাবে সংবদ্ধ হয়। অর্থাৎ এইসব কেন্দ্রকের সর্বশেষ প্রোটন বা নিউট্রনের বন্ধন শক্তি উপরোক্ত সংখ্যাগুলি অপেক্ষা একটি কম বা বেশী সংখ্যক প্রোটন অথবা নিউট্রন সম্পন্ন কেন্দ্রকের সর্বশেষ প্রোটন বা নিউট্রনের বন্ধন শক্তির তুলনায় যথেষ্ট বেশী হয়। এর থেকে প্রতীয়মান হয় যে যদি কোন কেন্দ্রকে উপরোক্ত যে কোন সংখ্যক

প্রোটন বা নিউট্রন বর্তমান থাকে তাহলে কেন্দ্রকের মধ্যে এক একটি খোলস পূর্ণ হয়। উপরে প্রদত্ত সংখ্যাগুলিকে বলা হয় 'ম্যাজিক-সংখ্যা' (Magic Numbers)।

কোয়ানটাম বলবিদ্যা (Quantum Mechanics) অনুযায়ী যখন কোন ভৌত মণ্ডলী (Physical System), যথা পরমাণবিক ইলেকট্রন মণ্ডলী বা কেন্দ্রকীয় মণ্ডলী, একটি গভীর বিভব কূপের (Potential Well) মধ্যে অবস্থিত থাকে, তখন উক্ত ভৌত মণ্ডলী কতকগুলি নির্দিষ্ট শক্তি সম্পন্ন শক্তিস্তরে অবস্থান করতে পারে। মেয়ার এবং ইয়েনসেন (Meyer and Jensen) কেন্দ্রকের মধ্যে এইরূপ একটি গভীর আয়তাকার (Rectangular) বিভব কূপের অস্তিত্ব কল্পনা করেন। তাঁরা আরও অনুমান করেন কেন্দ্রকস্থ নিউট্রন বা প্রোটনগুলির ঘর্ণন এবং কক্ষীয় কৌণিক ভরবেগের সংযোজনের (Spin-Orbit Coupling) প্রবণতা খুব তীব্র হয়। এই দুই অনুমানের ভিত্তিতে তাঁরা কেন্দ্রকের খোলস তত্ত্ব (Shell Theory) উদ্ভাবিত করেন। তাঁদের তত্ত্বের ভিত্তিতে ম্যাজিক-সংখ্যাগুলির অস্তিত্ব সহজেই ব্যাখ্যা করা যায়। তাছাড়া আরও নানাবিধ কেন্দ্রকীয় ধর্ম ( যথা কৌণিক ভরবেগ ) এই তত্ত্বের সাহায্যে ভাল ভাবে ব্যাখ্যা করা যায়। এ সম্বন্ধে বিস্তারিত আলোচনা বর্তমান গ্রন্থের বিষয় সীমার বহির্ভূত।

## 16.16 : কেন্দ্রকের সাধারণ ধর্মাবলী

কেন্দ্রকের বিভিন্ন ধর্মাবলীর মধ্যে কেন্দ্রকীয় ভর, বন্ধনশক্তি, বল, ব্যাসার্ধ, আধান, কৌণিক ভরবেগ ( ঘূর্ণন ), চৌম্বক ভ্রামক, শক্তিস্তর, ইত্যাদি বিশেষ গুরুত্বপূর্ণ। এর মধ্যে কেন্দ্রকীয় ভর, বন্ধনশক্তি এবং বল সম্বন্ধে পূর্ববর্তী কয়েকটি অনুচ্ছেদে বিস্তারিত আলোচনা করা হয়েছে।

কেন্দ্রকের ব্যাসার্ধ সম্বন্ধে (12·14) অনুচ্ছেদে সংক্ষেপে আলোচনা করা হয়েছে। আমরা দেখেছি যে $A$ ভর-সংখ্যা সম্পন্ন কেন্দ্রকের ব্যাসার্ধ $R$ হচ্ছে $A^{\frac{1}{3}}$ এর সমানুপাতিক। অর্থাৎ

$$R = r_0 A^{\frac{1}{3}}$$

$r_0$ ধ্রুবকটির মান হচ্ছে প্রায় $1{\cdot}2\times10^{-13}$ সেমি। নানারূপ বিক্ষেপ (Scattering) পরীক্ষার সাহায্যে কেন্দ্রকের ব্যাসার্ধ পরিমাপ করা যায়। সমশক্তি সম্পন্ন নিউট্রনগুচ্ছ যদি কেন্দ্রক থেকে বিক্ষিপ্ত করা যায় তাহলে বিক্ষিপ্ত নিউট্রনের কৌণিক বিতরণ (Angular Distribution) থেকে

কেন্দ্রকের ব্যাসার্ধ পাওয়া যায়। যেহেতু কেন্দ্রকীয় বিক্রিয়া বল কেন্দ্রকের উপরিতল থেকে খুব অল্প দূরত্ব পর্যন্ত ক্রিয়া করে, এইরূপ পরীক্ষার দ্বারা নিরূপিত ব্যাসার্ধ সাধারণতঃ কেন্দ্রকের প্রকৃত ব্যাসার্ধ অপেক্ষা অল্প বেশী পাওয়া যায়। উচ্চশক্তি প্রোটন বিক্ষেপ বা $\alpha$-বিক্ষেপ পরীক্ষার দ্বারাও কেন্দ্রকের ব্যাসার্ধের অনুরূপ মান পাওয়া যায়। বর্তমানে অতি উচ্চশক্তি (কয়েক শত মি-ই-ভো পর্যন্ত) ইলেকট্রন কেন্দ্রক থেকে বিক্ষিপ্ত করে কেন্দ্রকের ব্যাসার্ধ সঠিক ভাবে পরিমাপ করার পদ্ধতি উদ্ভাবিত হয়েছে।

কেন্দ্রকের আধান নির্ণয়ের জন্য চ্যাড্উইকের $\alpha$-বিক্ষেপ পরীক্ষার কথা (12·13) অনুচ্ছেদে বর্ণিত হয়েছে।

আমরা ইতিপূর্বে উল্লেখ করেছি যে নিউট্রন এবং প্রোটন উভয় প্রকার কেন্দ্রকীয় কণিকারই ইলেকট্রনের মত একটি নিজস্ব ঘূর্ণন কৌণিক ভরবেগ (Spin Angular Momentum) আছে। দুই প্রকার কণিকার ক্ষেত্রেই এর মান $\frac{1}{2}\frac{h}{2\pi}$ হয়, যেখানে $h$ হচ্ছে প্ল্যাংক-ধ্রুবক। কেন্দ্রকের মোট কৌণিক ভরবেগ হচ্ছে নিউক্লীয়নগুলির মোট ঘূর্ণন কৌণিক ভরবেগ এবং কেন্দ্রকের কক্ষীয় (Orbital) কৌণিক ভরবেগের লব্ধির (Resultant) সমান। যেহেতু $h/2\pi$ এর এককে কক্ষীয় কৌণিক ভরবেগ সব সময় পূর্ণ সংখ্যা অথবা শূন্য হয়, অতএব মোট কেন্দ্রকীয় কৌণিক ভরবেগ পূর্ণ বা অর্ধপূর্ণ সংখ্যা হবে, যদি নিউক্লীয়ন সংখ্যা $A$ যথাক্রমে জোড় বা বিজোড় হয়। কেন্দ্রকের মোট কৌণিক ভরবেগ ($I$) পরিমাপের নানাবিধ পদ্ধতি উদ্ভাবিত হয়েছে, যথা পরমাণবিক বর্ণালীর অতিসূক্ষ্ম গঠন (Hyperfine Structure) নির্ণয়, পটি-বর্ণালীর (Band Spectrum) রেখাগুলির পর্যায়ক্রমে পরিবর্তনশীল তীব্রতা (Alternating Intensity) নির্ণয়, আণবিক-রশ্মি পদ্ধতি (Molecular Beam Method) ইত্যাদি।

ইলেকট্রনের মত নিউট্রন এবং প্রোটনের নিজস্ব চৌম্বক-ভ্রামক Magnetic Moment) আছে। এদের মান হচ্ছে যথাক্রমে

$$\mu_p = 2{\cdot}793\,\mu_N$$

$$\mu_n = -1{\cdot}913\,\mu_N$$

এখানে $\mu_N = eh/4\pi M_p c$ সংখ্যাটিকে 'কেন্দ্রকীয় ম্যাগনেটন' (Nuclear

Magneton) বলা হয়। ( তুলনীয় ইলেকট্রনের ক্ষেত্রে বোর ম্যাগনেটন ; 5·4 অনুচ্ছেদ দ্রষ্টব্য )। এখানে $M_p$ হচ্ছে প্রোটনের ভর। $\mu_N$ এর মান বোর ম্যাগনেটনের 1836 ভাগের এক ভাগ মাত্র।

যদি প্রোটনের ক্ষেত্রে ইলেকট্রনের মত ডিরাক্ ইলেকট্রন তত্ত্ব প্রযোজ্য হত, তাহলে এর চৌম্বক-ভ্রামক $\mu_p$ কেন্দ্রকীয় ম্যাগনেটনের সমান হওয়া উচিত ছিল। কিন্তু প্রকৃতপক্ষে এর মান কেন্দ্রকীয় ম্যাগনেটন অপেক্ষা বেশী হয়। তাছাড়া নিউট্রন একটি আধানহীন কণিকা। সুতরাং এর ঘূর্ণনের ফলে কোন তড়িৎ প্রবাহের সৃষ্টি হয় না। সুতরাং সাধারণ যুক্তিতে এর চৌম্বক-ভ্রামক থাকার কারণ বোঝা যায় না।

প্রোটনের চৌম্বক-ভ্রামকের অস্বাভাবিক (Anomalous) মান এবং নিউট্রনের চৌম্বক-ভ্রামকের অস্তিত্ব নিম্নলিখিত উপায়ে মোটামুটিভাবে বোঝা যায়। ইউকাওয়ার কল্পনা অনুযায়ী প্রোটন এবং নিউট্রন পরস্পরের মধ্যে ধনাত্মক বা ঋণাত্মক আধান সম্পন্ন $\pi$-মেসন বিনিময় করে। প্রোটন মুহূর্তের জন্য একটি ধনাত্মক $\pi^+$ মেসন নিক্ষেপ করে নিউট্রনে রূপান্তরিত হয়। পরমুহূর্তে আবার $\pi^+$ মেসনটি শোষণ করে পূর্বাবস্থায় ফিরে আসে। এইরূপ প্রক্রিয়ার বারবার পুনরাবৃত্তি হতে থাকে। অনুরূপে একটি নিউট্রন ঋণাত্মক $\pi^-$ মেসন মুহূর্তের জন্য নিক্ষেপ করে প্রোটনে রূপান্তরিত হয় এবং পরমুহূর্তে সেটি শোষণ করে পূর্বরূপ প্রাপ্ত হয়। যেহেতু একটি মুক্ত প্রোটন তার দেহ থেকে ক্রমাগত $\pi^+$ মেসন নিক্ষেপ করতে এবং পরক্ষণে সেটিকে শোষণ করতে থাকে, সুতরাং মনে করা যায় যে একটি প্রোটন যেন সব সময়ে মেঘের মত মেসনের আধান দ্বারা পরিবৃত থাকে। যেহেতু $\pi$-মেসনের ভর প্রোটন অপেক্ষা অনেক কম, এর চৌম্বক-ভ্রামক $\mu_\pi$ কেন্দ্রকীয় ম্যাগনেটন অপেক্ষা অনেক বেশী হয় $\left(\mu_\pi \propto \dfrac{1}{m_\pi}\right)$। অতএব প্রোটনের চৌম্বক-ভ্রামক কেন্দ্রকীয় ম্যাগনেটন অপেক্ষা কিছু বেশী হয়। অনুরূপে একটি মুক্ত নিউট্রন তার দেহ থেকে ক্রমাগত $\pi^-$ মেসন নিক্ষেপ এবং শোষণ করতে থাকে। যেহেতু $\pi^-$ মেসন একটি আহিত কণিকা, এর একটা চৌম্বক-ভ্রামক আশা করা যায়। সুতরাং নিউট্রনেরও ঋণাত্মক আধানবাহী কণিকার মত চৌম্বক-ভ্রামক থাকে। $\mu_n$ সংখ্যাটির ঋণাত্মক চিহ্নের তাৎপর্য হচ্ছে যে এই চৌম্বক-ভ্রামকের দিক নিউট্রনের ঘূর্ণন কৌণিক ভরবেগের বিপরীতমুখী হয়।

কেন্দ্রকীয় চৌম্বক-ভ্রামক খুব সঠিক ভাবে নির্ণয় করার নানারূপ পদ্ধতি উদ্ভাবিত হয়েছে। এইসব চৌম্বক-ভ্রামকের মান কেন্দ্রকীয় ম্যাগনেটনের সমমাত্রিক হয়। এ সম্বন্ধে বিস্তারিত আলোচনা বর্তমান গ্রন্থের বিষয় সীমা বহির্ভূত।

# পরিচ্ছেদ—17

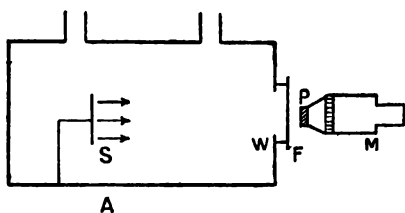
# কৃত্রিম উপায়ে কেন্দ্রক রূপান্তর

## 17.1 : কৃত্রিম উপায়ে কেন্দ্রক রূপান্তর ; রাদারফোর্ডের পরীক্ষা

মানব সভ্যতার আদি যুগ থেকে লোহা, তামা ইত্যাদি সহজলভ্য নিম্ন শ্রেণীর ধাতুকে উচ্চ শ্রেণীর মূল্যবান ধাতুতে রূপান্তরিত করা যায় কী না তা জানবার একটা অদম্য আকাঙ্ক্ষা মানুষের মনে ছিল। পৃথিবীর নানা স্থানে বহু ব্যক্তি এইরূপ রূপান্তরণ সম্ভব বলে মনে করতেন। মধ্যযুগীয় ইউরোপে অ্যালকেমি নামে এক প্রকার নকল বিজ্ঞান গড়ে উঠেছিল। অ্যালকেমিবিদ্‌গণ লোহা প্রভৃতি ধাতুকে সোনায় রূপান্তরিত করতে সক্ষম বলে দাবী করতেন। কিন্তু তাঁদের দাবীর কোন ভিত্তি ছিল না।

বর্তমান শতাব্দীতে তেজস্ক্রিয়তা আবিষ্কারের পর যখন রাদারফোর্ড প্রভৃতি বিজ্ঞানীগণের গবেষণা থেকে প্রমাণিত হয় যে তেজস্ক্রিয় মৌলসমূহ স্বতঃস্ফূর্তভাবে অন্য মৌলে রূপান্তরিত হয়, তখন বিজ্ঞানীদের মনে অ্যালকেমিবিদ্‌গণের প্রাচীন স্বপ্ন আবার জাগরিত হয়ে ওঠে। কেন্দ্রকের গঠন সম্বন্ধে বর্তমানে প্রচলিত ধারণা অনুযায়ী আমরা বুঝতে পারি যে কেন্দ্রকের অভ্যন্তরে নিউট্রন বা প্রোটন সংখ্যার পরিবর্তন ঘটাতে পারলে কেন্দ্রক রূপান্তর করা সম্ভব হয়। বস্তুতঃ যদি প্রোটন সংখ্যার পরিবর্তন ঘটান যায় তাহলে পরমাণবিক সংখ্যা $Z$ পরিবর্তিত হয় এবং এক প্রকার মৌল থেকে অন্য প্রকার মৌল পাওয়া যায়। অপরপক্ষে যদি কেন্দ্রকের নিউট্রন সংখ্যার পরিবর্তন ঘটে তাহলে একই মৌলের এক প্রকার আইসোটোপ থেকে অন্য প্রকার আইসোটোপ পাওয়া যায়। কেন্দ্রক রূপান্তরণের পথে সব থেকে বড় অন্তরায় হচ্ছে কেন্দ্রকের দৃঢ় সংবদ্ধ গঠন। স্পষ্টতঃ কেন্দ্রকের অভ্যন্তর থেকে কোন কণিকাকে অপসৃত করতে হলে অন্ততঃ এর বন্ধন শক্তির সম পরিমাণ শক্তি কেন্দ্রককে সরবরাহ করতে হবে। এই শক্তি বাইরে থেকে সরবরাহ করতে হলে কোন কেন্দ্রকীয় কণিকা, যথা প্রোটন, নিউট্রন, ডয়টেরন বা $\alpha$-কণিকা, কেন্দ্রকের মধ্যে অনুপ্রবেশ করান প্রয়োজন। যেহেতু নিউট্রন ছাড়া অন্যান্য কণিকাগুলি ধনাত্মক আধান বহন করে, এগুলি কেন্দ্রকের ধনাত্মক আধানের দ্বারা বিকৃষ্ট হয়। সুতরাং এদের শক্তি খুব উচ্চ না হলে এরা কেন্দ্রকের মধ্যে প্রবেশ করতে পারে না।

১৯১৯ সালে লর্ড রাদারফোর্ড সর্বপ্রথম তেজস্ক্রিয় পদার্থ নিঃসৃত উচ্চশক্তি α-কণিকা ব্যবহার করে কেন্দ্রক রূপান্তর করতে সক্ষম হন। এখানে তাঁর এই যুগান্তরকারী পরীক্ষা সম্বন্ধে সংক্ষেপে আলোচনা করা হবে।

(17·1) চিত্রে A হচ্ছে একটি আবদ্ধ আধার, যা বিভিন্ন গ্যাস দ্বারা পূর্ণ করা যায়। S হচ্ছে একটি α-কণিকা নিঃসরণকারী তেজস্ক্রিয় উৎস

চিত্র 17·1

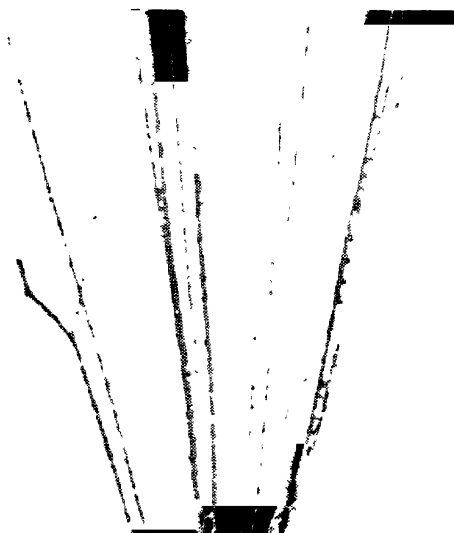
কেন্দ্রক রূপান্তর নিরীক্ষণের জন্য রাদারফোর্ডের পরীক্ষা ব্যবস্থা।

(যথা RaC) এবং P একটি ZnS লিপ্ত প্রতিপ্রভ (Fluorescent) পর্দা, যা আধারটির একধারে একটি পাতলা রৌপ্যপাত F দ্বারা আচ্ছাদিত W জানালার ঠিক বাইরে স্থাপিত থাকে। প্রতিপ্রভ পর্দার ঠিক পিছনে একটি অণুবীক্ষণ M রাখা থাকে, যার সাহায্যে P পর্দার উপরে উৎপন্ন দীপ্তির চমকসমূহ (Scintillation) পর্যবেক্ষণ করা যায়। তেজস্ক্রিয় উৎসের অবস্থান পরিবর্তন করে S এবং P পর্দাটির মধ্যেকার দূরত্ব পরিবর্তন করা যায়।

রাদারফোর্ডের যন্ত্রে W জানালার আচ্ছাদনকারী F রৌপ্যপাতের বেধ এমন ছিল যে S উৎস থেকে নিঃসৃত α-কণিকাগুলি সম্পূর্ণভাবে পাতটির মধ্যে শোষিত (Absorbed) হয়ে যায়। তাছাড়া উৎস S এবং P প্রতিপ্রভ পর্দার মধ্যেকার দূরত্ব আধার মধ্যস্থ গ্যাসের ভিতরে α-কণিকাগুলির পথসীমা (Range) অপেক্ষা বেশী রাখা হয়। সুতরাং S থেকে নিঃসৃত α-কণিকাগুলির পক্ষে কোনক্রমেই P পর্দার উপরে আপতিত হয়ে দীপ্তির চমক উৎপাদন করা সম্ভব ছিল না। এই অবস্থায় A আধারটিকে নাইট্রোজেন গ্যাসের দ্বারা পূর্ণ করলে দেখা যায় যে P পর্দার উপরে মাঝে মাঝে দীপ্তির চমক উৎপন্ন হয়। P পর্দা থেকে S উৎসের দূরত্ব প্রায় 40 সেমি দূর

পর্যন্ত বাড়িয়েও এইরূপ চমক দেখতে পাওয়া যায়। এর থেকে রাদারফোর্ড সিদ্ধান্ত করেন যে $\alpha$-কণিকাগুলির দ্বারা সংঘাত প্রাপ্ত নাইট্রোজেন পরমাণুর কেন্দ্রক থেকে কোন এক প্রকার দীর্ঘ পথসীমা সম্পন্ন কণিকা নিঃসৃত হয়; এই কণিকাগুলিই P পর্দার উপরে দীপ্তির চমক উৎপাদনের জন্য দায়ী। চৌম্বক ক্ষেত্রের দ্বারা বিচ্যুত করে রাদারফোর্ড প্রমাণ করেন যে এই কণিকাগুলি হচ্ছে প্রোটন।

এগুলি যে আধার মধ্যস্থ নাইট্রোজেনের সংগে মিশ্রিত অপদ্রব্য (Impurity) হাইড্রোজেন গ্যাস থেকে নিঃসৃত প্রোটন নয় তা রাদারফোর্ড পরীক্ষার দ্বারা প্রমাণিত করেন।

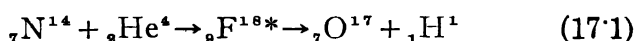
তাত্ত্বিক ভিত্তিতে দেখা যায় যে হাইড্রোজেন গ্যাসের মধ্য দিয়ে পরিভ্রমণ কালে উপরোল্লিখিত $\alpha$-কণিকাগুলি স্থিতিস্থাপক সংঘাত দ্বারা সর্বাধিক 28 সেমি দীর্ঘ পথসীমার প্রোটন নিঃসৃত করে। কিন্তু উপরে বর্ণিত পরীক্ষায় নিঃসৃত প্রোটনগুলির সর্বাধিক পথসীমা পাওয়া যায় প্রায় 40 সেমি। এর থেকে রাদারফোর্ড সিদ্ধান্ত করেন যে চমক পর্দার উপরে আপতিত প্রোটনগুলি $\alpha$-কণিকার আঘাতে নাইট্রোজেন পরমাণুর কেন্দ্রক বিঘটিত হবার ফলে নিঃসৃত হয়। রাদারফোর্ড এবং চ্যাড্‌উইক (Rutherford and Chadwick) এরপর নাইট্রোজেন ছাড়া আরও নানাবিধ হালকা মৌল নিয়ে উপরোক্ত পরীক্ষা করেন এবং কেবল কার্বন ও অক্‌সিজেন ছাড়া আর সবক্ষেত্রে প্রোটন নিঃসরণের নিদর্শন পান। অর্থাৎ এই সব ক্ষেত্রেই $\alpha$-কণিকার সংঘাতে কৃত্রিম উপায়ে কেন্দ্রক বিঘটনের (Artificial Disintegration of Nuclei) নিদর্শন পাওয়া যায়। রাদারফোর্ড এবং চ্যাড্‌উইক বিভিন্ন মৌলের ক্ষেত্রে নিঃসৃত প্রোটনের পথসীমা পরিমাপ করে তাদের শক্তি নির্ণয় করেন। কোন কোন ক্ষেত্রে নিঃসৃত প্রোটনের শক্তি $\alpha$-কণিকার প্রাথমিক শক্তি অপেক্ষাও বেশী হয়। প্রোটনগুলি যে কোন প্রকার স্থিতিস্থাপক সংঘাতের দ্বারা নিঃসৃত হয় না উপরোক্ত তথ্য থেকে তা নিশ্চিতভাবে প্রমাণিত হয়। কারণ শক্তি সংরক্ষণ সূত্র অনুযায়ী স্থিতিস্থাপক সংঘাতের (Elastic Collisions) ফলে নিঃসৃত প্রোটনের শক্তি $\alpha$-কণিকার প্রাথমিক শক্তি অপেক্ষা কম হবার কথা। স্পষ্টতঃ উপরে আলোচিত পরীক্ষায় প্রোটনগুলি বিঘটন প্রক্রিয়ার ফলে এইরূপ অতিরিক্ত শক্তি অর্জন করে।

চিত্র 17·2

ব্ল্যাকেট কর্তৃক প্রাপ্ত নাইট্রোজেন কেন্দ্রক রূপান্তরের মেঘকক্ষ চিত্র।

( কেমব্রিজ ইউনিভার্সিটি প্রেস কর্তৃক প্রকাশিত রাদারফোর্ড, চ্যাডউইক ও এলিস্ প্রণীত Radiations from Radioactive Substances গ্রন্থ থেকে প্রাপ্ত )

## 17·2 : ব্ল্যাকেটের মেঘ-কক্ষ পরীক্ষা

বিঘটনের ফলে সৃষ্ট কেন্দ্রকের প্রকৃতি নিরূপণের জন্য বৃটিশ বিজ্ঞানী ব্ল্যাকেট (P.M.S. Blackett) ১৯২৫ সালে উইলসন মেঘ-কক্ষ (Wilson Cloud Chamber) ব্যবহার করে কতকগুলি পরীক্ষা করেন। তিনি নাইট্রোজেন গ্যাসপূর্ণ মেঘ-কক্ষের মধ্যে পরিভ্রমণশীল $\alpha$-কণিকার ভ্রমণপথের (Tracks) আলোকচিত্র গ্রহণ করেন। প্রায় চার লক্ষ $\alpha$-কণিকার ভ্রমণপথ সম্বলিত 20,000 আলোকচিত্র যত্ন সহকারে পর্যবেক্ষণ করে ব্ল্যাকেট মাত্র আটটি বিশেষ ধরনের আলোকচিত্র পান, যার একটির নিদর্শন (17·2) চিত্রে প্রদর্শিত হয়েছে। এই চিত্র থেকে দেখা যায় যে একটি ছাড়া আর সমস্ত $\alpha$-কণিকার ভ্রমণপথই এক একটি সরল রেখা। একটি মাত্র $\alpha$-কণিকার ক্ষেত্রে সরলরেখা ভ্রমণপথটি কিছুটা দূর পর্যন্ত গিয়ে হঠাৎ শেষ হয়ে যায়। এই শেষ প্রান্ত থেকে আর দুটি কণিকার ভ্রমণপথ শুরু হতে দেখা যায়। এদের মধ্যে একটি অপেক্ষাকৃত ক্ষীণ; এটি একটি প্রোটনের ভ্রমণপথ। অন্যটি খুব স্থূল; এটি অপেক্ষাকৃত গুরুভার কোন পরমাণু কেন্দ্রকের ভ্রমণপথ। ব্ল্যাকেট লক্ষ্য করেন যে $\alpha$-কণিকার এবং নবসৃষ্ট কণিকা দুটির ভ্রমণপথগুলি সব একই সমতলে অবস্থিত থাকে। এই চিত্রের সঠিক ব্যাখ্যা করার জন্য ব্ল্যাকেট অনুমান করেন যে নাইট্রোজেন কেন্দ্রকের সংগে সংঘাতের ফলে $\alpha$-কণিকাটি সম্পূর্ণ বিলুপ্ত হয় এবং একটি নূতন কণিকা ( প্রোটন ) ও একটি নূতন কেন্দ্রক উৎপন্ন হয়। ভরবেগ সংরক্ষণ সূত্র অনুযায়ী $\alpha$-কণিকার ভ্রমণপথ এবং নবসৃষ্ট কণিকা ও কেন্দ্রকের ভ্রমণপথ দুটি এক সমতলে থাকার কথা। অন্যথা এদের মধ্যে যে কোন দুটি কণিকার ভ্রমণপথ দ্বারা নির্ধারিত সমতলের অভিলম্ব দিকে ভরবেগ সংরক্ষণ সম্ভব হয় না। স্পষ্টতঃ এইরূপ বিঘটন প্রক্রিয়াকে আমরা নিম্নলিখিত সমীকরণ দ্বারা নির্দেশিত করতে পারি ঃ

$$_{7}N^{14} + _{2}He^{4} \rightarrow _{9}F^{18*} \rightarrow _{7}O^{17} + _{1}H^{1} \qquad (17·1)$$

অর্থাৎ নবসৃষ্ট কেন্দ্রকটি হচ্ছে অক্সিজেনের $O^{17}$ আইসোটোপ।

এখানে উল্লেখযোগ্য যে রাদারফোর্ড নাইট্রোজেন কেন্দ্রক বিঘটন সম্বন্ধীয় পরীক্ষার পর অনুমান করেন যে $\alpha$-কণিকাটি হয় নাইট্রোজেন কেন্দ্রক কর্তৃক সম্পূর্ণ শোষিত হয়ে একটি প্রোটন ও একটি $O^{17}$ কেন্দ্রক সৃষ্টি করে; আর না হয় এটি নাইট্রোজেন কেন্দ্রক থেকে একটি প্রোটনকে ধাক্কা দিয়ে নির্গত করে। যদি এই শেষোক্ত অনুমান ঠিক হয়, তাহলে সংঘাতের পরে $\alpha$-কণিকাটিও নির্গত হয়ে আসবে এবং নবসৃষ্ট কেন্দ্রকটি হবে $C^{13}$ পরমাণুর কেন্দ্রক।

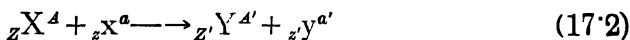
অর্থাৎ এক্ষেত্রে বিঘটনের পরে তিনটি কণিকার সৃষ্টি হবে। এক্ষেত্রে আপতিত α-কণিকার এবং সৃষ্ট কণিকা তিনটির ( প্রোটন, $C^{13}$ কেন্দ্রক এবং নিঃসৃত α-কণিকার ) ভ্রমণপথগুলি সব এক সমতলে নাও থাকতে পারে। এই সিদ্ধান্তের সংগে ব্ল্যাকেটের উপরোক্ত পরীক্ষালব্ধ তথ্যের সংগতি পাওয়া যায় না। সুতরাং ব্ল্যাকেটের মেঘ-কক্ষ পরীক্ষা থেকে প্রমাণিত হয় যে রাদারফোর্ডের প্রথম অনুমানই ঠিক ছিল। এই পরীক্ষা থেকে আরও দেখা যায় যে কোন গ্যাসের মধ্যে কয়েক সেণ্টিমিটার দীর্ঘ পথ অতিক্রম করবার সময়ে একটি α-কণিকা কর্তৃক কোন পরমাণু কেন্দ্রকের সংগে সংঘাত লাভের সম্ভাব্যতা (Probability) খুবই কম হয়,—প্রায় প্রতি পঞ্চাশ সহস্রে একবার বা আরও কম। এর থেকে পরমাণু কেন্দ্রকের আয়তনের ক্ষুদ্রতা সম্পর্কিত রাদারফোর্ডের মতবাদ ( 12·11 অনুচ্ছেদ দ্রষ্টব্য ) সমর্থিত হয়।

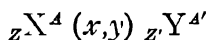
ব্ল্যাকেটের পরীক্ষার ফলাফল থেকে এবং পরবর্তী যুগে কেন্দ্রকীয় বিক্রিয়া সম্পর্কিত আরও নানারূপ তথ্য বিশ্লেষণ করে প্রখ্যাত দিনেমার বিজ্ঞানী নীল্‌স্ বোর (Niels Bohr) অনুমান করেন যে কেন্দ্রক বিক্রিয়ার সময়ে আপতিত কণিকাটি আদি কেন্দ্রক দ্বারা শোষিত হয়ে একটি ক্ষণস্থায়ী যৌগ-কেন্দ্রক (Compound Nucleus) গঠন করে। উত্তেজিত অবস্থায় সৃষ্ট এই যৌগ-কেন্দ্রকটি প্রায় $10^{-16}$ সেকেণ্ড পরে বিঘটিত হয় যার ফলে একটি কেন্দ্রকীয় কণিকা নিঃসৃত হয় এবং একটি অবশিষ্ট কেন্দ্রক পড়ে থাকে। রাদারফোর্ডের পরীক্ষায় এই ভাবে সৃষ্ট যৌগ-কেন্দ্রকটি $F^{18*}$ ছিল। (17·1) সমীকরণে এই যৌগ-কেন্দ্রকটির উৎপত্তি একটি মধ্যবর্তী ধাপ (Intermediate Step) হিসাবে দেখান হয়েছে। এর পাশে তারকা চিহ্ন দ্বারা এর উত্তেজিত অবস্থা নির্দেশিত হয়েছে। (17·19) অনুচ্ছেদে বোরের যৌগ-কেন্দ্রক মতবাদ সম্বন্ধে আরও বিস্তারিত আলোচনা করা হবে।

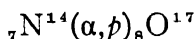
## 17·3 : কৃত্রিম উপায়ে কেন্দ্রক-রূপান্তরের ক্ষেত্রে প্রযোজ্য সংরক্ষণ সূত্রাবলী

মনে করা যাক যে $Z$ পরমাণবিক সংখ্যা (Atomic Number) এবং $A$ ভর-সংখ্যা (Mass Number) সম্পন্ন X পরমাণুর কেন্দ্রক α-কণিকা বা অনুরূপ কোন কণিকার দ্বারা সংঘাত প্রাপ্ত হয়। x চিহ্ন দ্বারা নির্দেশিত এই আপতিত বা প্রক্ষিপ্ত (Projectile) কণিকাটির পরমাণবিক সংখ্যা এবং ভর-সংখ্যা যথাক্রমে $z$ এবং $a$ ধরা যাক। আপতিত কণিকার সংগে সংঘাতের ফলে কেন্দ্রকটি বিঘটিত হয় এবং তার ফলে একটি কেন্দ্রকীয় কণিকা y ( যথা

প্রোটন, নিউট্রন, α-কণিকা, প্রভৃতি ) নিঃসৃত হয় ও Y অবশিষ্ট কেন্দ্রক (Residual Nucleus) সৃষ্ট হয়। এদের পরমাণবিক সংখ্যা যথাক্রমে $z'$ ও $Z'$ এবং ভর-সংখ্যা যথাক্রমে $a'$ ও $A'$ ধরা যাক। আলোচ্য কেন্দ্রক-রূপান্তর প্রক্রিয়া আমরা নিম্নলিখিত সমীকরণ দ্বারা নির্দেশ করতে পারি ঃ

$$_{Z}X^{A} + _{z}x^{a} \longrightarrow _{Z'}Y^{A'} + _{z'}y^{a'} \qquad (17{\cdot}2)$$

এই সমীকরণটিকে সংক্ষেপে নিম্নলিখিত উপায়ে নির্দেশ করা যায় ঃ

$$_{Z}X^{A}\ (x,y)\ _{Z'}Y^{A'}$$

উদাহরণস্বরূপ রাদারফোর্ড কর্তৃক আবিষ্কৃত প্রথম কেন্দ্রকীয় রূপান্তর প্রক্রিয়াকে (সমীকরণ 17·1) আমরা লিখতে পারি ঃ

$$_{7}N^{14}(\alpha,p)_{8}O^{17}$$

এখানে $\alpha$ এবং $p$ যথাক্রমে আপতিত α-কণিকা এবং নিঃসৃত প্রোটন নির্দেশ করে।

কৃত্রিম উপায়ে কেন্দ্রক রূপান্তরের ক্ষেত্রে প্রযোজ্য নিম্নলিখিত সংরক্ষণ সূত্র (Conservation Law) দুটি বিশেষ গুরুত্বপূর্ণ ঃ

**(ক) ভর-সংখ্যা সংরক্ষণ ঃ** কেন্দ্রক রূপান্তরে অংশ গ্রহণকারী আদি কেন্দ্রকের এবং প্রক্ষিপ্ত ( অর্থাৎ আপতিত ) কণিকার মোট প্রোটন-নিউট্রন সংখ্যা রূপান্তরের পরে অপরিবর্তিত থাকে। অর্থাৎ এই সংখ্যা রূপান্তরের ফলে নিঃসৃত কণিকার এবং অবশিষ্ট কেন্দ্রকের অভ্যন্তরস্থ মোট প্রোটন-নিউট্রন সংখ্যার সমান হয়। রূপান্তরের পূর্বে মোট প্রোটন-নিউট্রন সংখ্যা (17·2) সমীকরণের বাম দিকের কেন্দ্রক দুটির ভর-সংখ্যার সমষ্টির সমান। অপরপক্ষে রূপান্তরের পরে মোট প্রোটন-নিউট্রন সংখ্যা উক্ত সমীকরণের ডানদিকের কেন্দ্রক দুটির ভর-সংখ্যার সমষ্টির সমান। সুতরাং ভর-সংখ্যা সংরক্ষণ সূত্র অনুযায়ী আমরা পাই

$$A + a = A' + a' \qquad (17{\cdot}3)$$

উদাহরণস্বরূপ রাদারফোর্ডের নাইট্রোজেন কেন্দ্রক বিঘটন পরীক্ষায় বিঘটনের পূর্বে $N^{14}$ এবং α-কণিকার ($He^{4}$) মোট প্রোটন-নিউট্রনের সংখ্যা (14+4) অর্থাৎ 18 হয়। বিঘটনের ফলে যেহেতু এক একক ভর-সংখ্যা সম্পন্ন একটি প্রোটন ($H^{1}$) নির্গত হয়, অতএব অবশিষ্ট কেন্দ্রকটির ভর-সংখ্যা এমন হওয়া প্রয়োজন যাতে উক্ত কেন্দ্রক এবং নিঃসৃত কণিকার মোট প্রোটন-নিউট্রন সংখ্যাও

18 হয়। সেইজন্য (17·1) সমীকরণে অবশিষ্ট কেন্দ্রকের ভর-সংখ্যা 17 ধরা হয়েছে।

**(খ) পরমাণবিক-সংখ্যা সংরক্ষণ :** কেন্দ্রক রূপান্তরে অংশ গ্রহণকারী আদি কেন্দ্রক এবং প্রক্ষিপ্ত কণিকার (Projectile) মোট প্রোটন সংখ্যা রূপান্তরের পরে অপরিবর্তিত থাকে। এই সংখ্যা রূপান্তরের ফলে সৃষ্ট অবশিষ্ট কেন্দ্রক এবং নিঃসৃত কণিকার মোট প্রোটন সংখ্যার সমান হয়। যেহেতু কেন্দ্রক মধ্যস্থ প্রোটন সংখ্যা হচ্ছে পরমাণবিক সংখ্যার সমান, অতএব এই সংরক্ষণ সূত্র অনুযায়ী আমরা লিখতে পারি ( সমীকরণ 17·2 দ্রষ্টব্য ) :

$$Z+z=Z'+z' \qquad (17\cdot4)$$

উদাহরণস্বরূপ রাদারফোর্ডের নাইট্রোজেন কেন্দ্রক রূপান্তর পরীক্ষায় রূপান্তরের পূর্বে $N^{14}$ এবং $\alpha$-কণিকার পরমাণবিক সংখ্যার সমষ্টি $(7+2)$ অর্থাৎ 9 হয়। যেহেতু রূপান্তরের পরে নিঃসৃত প্রোটনের পরমাণবিক সংখ্যা হচ্ছে 1, সুতরাং অবশিষ্ট কেন্দ্রকের পরমাণবিক সংখ্যা 8 হবে। (17·1) সমীকরণে অবশিষ্ট কেন্দ্রকটিকে সেজন্য $O^{17}$ লেখা হয়েছে।

(17·3) এবং (17·4) সমীকরণ থেকে বোঝা যায় যে কেন্দ্রক রূপান্তর কালে মোট নিউট্রন সংখ্যাও অপরিবর্তিত থাকে।

উপরে প্রদত্ত সংরক্ষণ সূত্র দুটি ছাড়া কেন্দ্রক রূপান্তরের ক্ষেত্রে শক্তি এবং ভরবেগ সংরক্ষণ সূত্রগুলিও প্রযোজ্য।

### 17·4. কেন্দ্রক রূপান্তর এবং শক্তি সংরক্ষণ ; Q-সংখ্যা

কেন্দ্রক রূপান্তরের ক্ষেত্রে শক্তি সংরক্ষণ সূত্র প্রয়োগ করতে গেলে আইনষ্টাইনের ভর-শক্তি সমতা সূত্র (Mass Energy Equivalence) ব্যবহার করা প্রয়োজন। ইতিপূর্বে $\alpha$ বা $\beta$ বিঘটনের ক্ষেত্রে বিঘটন শক্তি নির্ণয় কালে আমরা এ সম্বন্ধে আলোচনা করেছি। সমীকরণ (17·2) দ্বারা নির্দেশিত কেন্দ্রক রূপান্তরকে অনেক সময় কেন্দ্রকীয়-বিক্রিয়া (Nuclear Reaction) আখ্যা দেওয়া হয়। কেন্দ্রকীয় বিক্রিয়া সমীকরণের বাম এবং ডান দিকের মোট শক্তি, অর্থাৎ বিক্রিয়ায় অংশ গ্রহণকারী কণিকাগুলির স্থির-শক্তি (Rest Energy) এবং গতিশক্তির সমষ্টি পরস্পরের সমান হওয়া প্রয়োজন। (17·2) সমীকরণে বিভিন্ন কেন্দ্রক এবং কণিকাগুলির পরমাণবিক ভর যদি $M_X$, $M_x$, $M_Y$ এবং $M_y$ হয়, তাহলে এই ভর-গুলিকে $c^2$ দ্বারা গুণ করলে এদের প্রত্যেকটির

স্থির শক্তি পাওয়া যায়। সাধারণতঃ কেন্দ্রকীয় বিক্রিয়া সংঘটনকালে প্রক্ষিপ্ত x-কণিকাটি $E_x$ গতিশক্তি সহকারে স্থির অবস্থায় আসীন X কেন্দ্রকের উপর আপতিত হয় ($E_X=0$)। কেন্দ্রকীয় বিক্রিয়ার ফলে সৃষ্ট অবশিষ্ট কেন্দ্রকের এবং নির্গত কণিকার গতিশক্তি যদি যথাক্রমে $E_Y$ $E_y$ হয়, তাহলে আমরা লিখতে পারি

$$M_Xc^2+M_xc^2+E_x=M_Yc^2+M_yc^2+E_Y+E_y \qquad (17{\cdot}5)$$

এখানে উল্লেখযোগ্য যে যদিও কেন্দ্রকীয় বিক্রিয়ার ক্ষেত্রে প্রযোজ্য ভর-শক্তি সংরক্ষণ সূত্রে কেন্দ্রকীয় ভর ব্যবহার করার কথা, (17·5) সমীকরণে কিন্তু পরমাণবিক ভর ব্যবহার করা হয়েছে। এর কারণ হচ্ছে যে উক্ত সমীকরণের দুই দিকে মোট ইলেকট্রনীয় ভর পরস্পরকে বাতিল করে।

কেন্দ্রকীয় বিক্রিয়ার সময়ে হয় কিছু পরিমাণ শক্তি উদ্ভূত হয়, না হয় কিছু শক্তি শোষিত হয়। প্রথম শ্রেণীর বিক্রিয়াকে 'শক্তি-দায়ী' (Exoergic) বিক্রিয়া এবং দ্বিতীয় শ্রেণীকে 'শক্তি-গ্রাহী' (Endoergic) বিক্রিয়া আখ্যা দেওয়া যায়। কেন্দ্রকীয় বিক্রিয়ার সময়ে মোট উদ্ভূত ( বা শোষিত ) শক্তিকে $Q$ দ্বারা নির্দেশিত করা হয়। একে আমরা $Q$-সংখ্যা বলতে পারি। সংজ্ঞা অনুযায়ী আমরা লিখতে পারি

$$Q=E_Y+E_y-E_x \qquad (17{\cdot}6)$$

(17·6) সমীকরণে $(E_Y+E_y)$ হচ্ছে বিক্রিয়ার ফলে সৃষ্ট Y এবং y কেন্দ্রক দুটির মোট গতিশক্তি, অর্থাৎ বিক্রিয়ার পরে উদ্ভূত শক্তি ; আর $E_x$ হচ্ছে বিক্রিয়া সৃষ্টিকারী প্রক্ষিপ্ত x কণিকার গতিশক্তি, অর্থাৎ বিক্রিয়ার পূর্বে সরবরাহ করা শক্তি।

$Q$ যদি ধনাত্মক হয়, তাহলে বিক্রিয়ার ফলে কিছু পরিমাণ শক্তি উদ্ভূত হয়। আর $Q$ যদি ঋণাত্মক হয়, তাহলে বিক্রিয়া অনুষ্ঠান করার জন্য কিছু শক্তি সরবরাহ করার প্রয়োজন হয়।

(17·5) সমীকরণে যদি বিভিন্ন রাশিগুলিকে পরমাণবিক ভরের এককে নির্দেশিত করা যায়, অর্থাৎ $c^2$ উহ্য রাখা যায়, তাহলে (17·6) সমীকরণ থেকে আমরা পাই

$$Q=M_X+M_x-M_Y-M_y \qquad (17{\cdot}7)$$

স্পষ্টতঃ এখানে $Q$ পাওয়া যাবে পরমাণবিক ভরের এককে ($amu$)। একে 931·2 দিয়ে গুণ করলে $Q$-সংখ্যার মান মি-ই-ভো এককে পাওয়া যায়।

যদি X, Y, x, y কেন্দ্রকগুলির বন্ধন-শক্তি (Binding Energy) হয় যথাক্রমে $B_X$, $B_Y$, $B_x$, $B_y$, তাহলে আমরা লিখতে পারি

$$M_X = ZM_H + NM_n - B_X\,,\quad M_Y = Z'M_H + N'M_n - B_Y$$

$$M_x = zM_H + nM_n - B_x,\quad M_y = z'M_H + n'M_n - B_y$$

অতএব (17·7) সমীকরণ থেকে পাওয়া যায়

$$Q = ZM_H + NM_n - B_X + zM_H + nM_n - B_x$$
$$- Z'M_H - N'M_n + B_Y - z'M_H - n'M_n + B_y$$

যেহেতু $Z + z = Z' + z'$ এবং $N + n = N' + n'$, অতএব আমরা পাই

$$Q = B_Y + B_y - B_X - B_x \qquad (17{\cdot}7a)$$

(17·7) সমীকরণ থেকে প্রতীয়মান হয় যে কেন্দ্রকীয় বিক্রিয়ায় অংশ গ্রহণকারী X এবং x আদি কেন্দ্রক দুটির পরমাণবিক ভরের সমষ্টি $(M_X + M_x)$ যদি সৃষ্ট Y এবং y কেন্দ্রক দুটির পরমাণবিক ভরের সমষ্টি $(M_Y + M_y)$ অপেক্ষা বেশী হয়, তাহলে $Q > 0$ হয়, এবং বিক্রিয়ার ফলে কিছু পরিমাণ শক্তি উদ্ভূত হয়। অর্থাৎ এই প্রকার বিক্রিয়া শক্তি-দায়ী (Exoergic) হয়। এক্ষেত্রে প্রাথমিক ভর-সমষ্টি এবং চরম ভর-সমষ্টির ব্যবধানের সমপরিমাণ ভর বিক্রিয়ার ফলে শক্তিতে রূপান্তরিত হয় এবং এই শক্তি উদ্ভূত হয়।

অপরপক্ষে $(M_X + M_x)$ যদি $(M_Y + M_y)$ অপেক্ষা কম হয়, তাহলে অন্ততঃ এই দুই ভর-সমষ্টির ব্যবধানের সমপরিমাণ শক্তি বিক্রিয়া কালে সরবরাহ না করতে পারলে বিক্রিয়া ঘটতে পারে না। এই শক্তি সাধারণতঃ প্রক্ষিপ্ত x কণিকাটির গতিশক্তি থেকে পাওয়া যায়। স্পষ্টতঃ এক্ষেত্রে $Q < 0$ হয়, এবং প্রক্ষিপ্ত কণিকার ন্যূনতম গতিশক্তি $(E_x)_{min}$ অন্ততঃপক্ষে $(-Q)$ সংখ্যাটির সমান হওয়া প্রয়োজন। প্রকৃতপক্ষে $(E_x)_{min}$ সংখ্যাটির মান $|Q|$ অপেক্ষা কিছু বেশী হওয়া প্রয়োজন। কারণ যেহেতু আপতিত কণিকার কিছু পরিমাণ ভরবেগ থাকে, অতএব ভরবেগ সংরক্ষণ সূত্র অনুযায়ী আপতিত কণিকা শোষিত হবার পরে যে ক্ষণস্থায়ী যৌগ-কেন্দ্রক (C) গঠিত হয়, তার ভরবেগ $p_C$ আপতিত কণিকার ভরবেগ $p_x$ এর সমান হয়। সুতরাং শক্তি-গ্রাহী (Endoergic) বিক্রিয়ার ক্ষেত্রে আপতিত কণিকার

শক্তি $E_x$ শুধু যে বিক্রিয়া সংঘটক ন্যূনতম শক্তি $|Q|$ সরবরাহ করে তাই নয়, এর কিছু অংশ ব্যয়িত হয় যৌগ-কেন্দ্রকের গতিশক্তি সরবরাহ করার জন্য। আপতিত কণিকার উপরোক্ত ন্যূনতম শক্তিকে বলা হয় 'সূচনা শক্তি' (Threshold Energy)। ভরবেগ এবং শক্তি সংরক্ষণ সূত্রদ্বয় থেকে লেখা যায়

$$M_x v_x = M_C v_C, \qquad \tfrac{1}{2} M_x v_x^2 = -Q + \tfrac{1}{2} M_C v_C^2$$

প্রথম সমীকরণ থেকে $v_C = M_x v_x / M_C$ পাওয়া যায়। সুতরাং দ্বিতীয় সমীকরণ থেকে আমরা পাই

$$\tfrac{1}{2} M_x v_x^2 = -Q + \tfrac{1}{2} M_C \left(\frac{M_x v_x}{M_C}\right)^2$$

$$= -Q + \tfrac{1}{2} M_x v_x^2 \cdot \frac{M_x}{M_C}$$

অর্থাৎ $$\tfrac{1}{2} M_x v_x^2 (1 - M_x/M_C) = -Q$$

অতএব সূচনা শক্তি পাওয়া যায়

$$E_{\text{th}} = \tfrac{1}{2} M_x v_x^2 = -\frac{Q}{1 - M_x/M_C} = -Q \cdot \frac{M_C}{M_C - M_x}$$

যেহেতু $M_C - M_x = M_X$, অতএব আমরা পাই

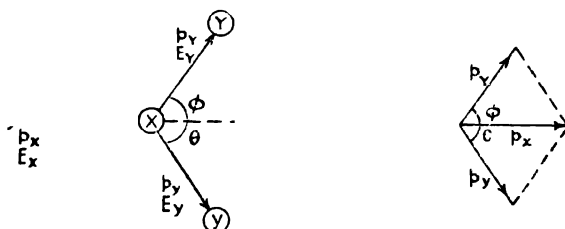
$$E_{\text{th}} = -Q \cdot \frac{M_X + M_x}{M_X} = -Q\,(1 + M_x/M_X) \qquad (17\text{·}8)$$

পরীক্ষার দ্বারা সূচনা-শক্তি $E_{\text{th}}$ পরিমাপ করে (17·8) সমীকরণের সাহায্যে $Q$ নির্ণয় করা সম্ভব হয়।

## 17·5 : Q-সংখ্যার পরিমাপ

সাধারণতঃ নিঃসৃত কণিকার গতিশক্তি $(E_y)$ পরিমাপ করে কেন্দ্রকীয় বিক্রিয়ার ক্ষেত্রে $Q$ নির্ণয় করা হয়।

(17·3) চিত্রে $X^A(x,y)Y^{A'}$ এই কেন্দ্রকীয় বিক্রিয়ায় অংশ গ্রহণকারী বিভিন্ন কণিকাগুলির গতিপথ প্রদর্শিত হয়েছে। প্রক্ষিপ্ত x-কণিকার গতিপথের সাপেক্ষে y এবং Y কেন্দ্রক দুটি θ এবং φ কোণে নিঃসৃত হয়। অনেক ক্ষেত্রে অবশিষ্ট কেন্দ্রক Y অন্য কেন্দ্রকটির (নিঃসৃত কণিকার) তুলনায় বেশী ভারী হয়। সেজন্য এর প্রতিক্ষেপ শক্তি (Recoil

Energy) কম হয়। যদি $p_x = \sqrt{2M_xE_x}$, $p_y = \sqrt{2M_yE_y}$ এবং $p_Y = \sqrt{2M_YE_Y}$ যথাক্রমে x, y এবং Y এই তিনটি কেন্দ্রকের ভরবেগ নির্দেশ করে, তাহলে ভরবেগ-সংরক্ষণ সূত্র থেকে আমরা পাই ঃ

চিত্র 17·3

কেন্দ্রক রূপান্তরে অংশ গ্রহণকারী কণিকাসমূহের ভ্রমণপথ এবং ভরবেগ সংরক্ষণ চিত্র।

x কণিকার গতিপথের অভিমুখে

$$\sqrt{2M_xE_x} = \sqrt{2M_yE_y}\cos\theta + \sqrt{2M_YE_Y}\cos\phi \qquad (17\cdot9)$$

x কণিকার গতিপথের অভিলম্বে

$$0 = \sqrt{2M_yE_y}\sin\theta - \sqrt{2M_YE_Y}\sin\phi \qquad (17\cdot10)$$

এছাড়া শক্তি-সংরক্ষণ সূত্র থেকে ইতিপূর্বে (17·6) সমীকরণটি পাওয়া গেছে ঃ

$$Q = E_Y + E_y - E_x \qquad (17\cdot6')$$

(17·9) এবং (17·10) সমীকরণদ্বয়ের বর্গ নির্ণয় করে যোগ করলে পাওয়া যায়

$$2M_YE_Y = 2M_xE_x + 2M_yE_y - 4\sqrt{M_xM_yE_xE_y}\cos\theta$$

$$E_Y = \frac{M_x}{M_Y}E_x + \frac{M_y}{M_Y}E_y - \frac{2}{M_Y}\sqrt{M_xM_yE_xE_y}\cos\theta \qquad (17\cdot11)$$

(17·6′) এবং (17·11) সমীকরণ থেকে আমরা পাই

$$Q = E_y\left(1+\frac{M_y}{M_Y}\right) - E_x\left(1-\frac{M_x}{M_Y}\right)$$

$$-\frac{2}{M_Y}\sqrt{M_xM_yE_xE_y}\cos\theta \qquad (17\cdot12)$$

(17·12) সমীকরণের সাহায্যে নির্দিষ্ট দিকে নিঃসৃত y-কণিকার গতিশক্তি পরিমাপ করে $Q$ নির্ণয় করা যায়।

যদি y কণিকাটি x এর গতিপথের অভিলম্বে নিঃসৃত হয়, তাহলে $\theta = \pi/2$ এবং $\cos\theta = 0$ হয়; এক্ষেত্রে (17·12) সমীকরণ থেকে পাওয়া যায়

$$Q = E_y(1 + M_y/M_Y) - E_x(1 - M_x/M_Y)$$

বিভিন্ন বিক্রিয়ার ক্ষেত্রে উপরে আলোচিত পদ্ধতিতে নির্ণীত $Q$-এর মানের সংগে (17·7) সমীকরণ থেকে প্রাপ্ত $Q$ তুলনা করলে ভাল সংগতি পাওয়া যায়। এর থেকে আইনষ্টাইনের ভর-শক্তি সমতা (Mass Energy Equivalence) সূত্রের সত্যতা দৃঢ়ভাবে প্রতিষ্ঠিত হয়।

উদাহরণস্বরূপ $N^{14}(\alpha, p)O^{17}$ বিক্রিয়ার ক্ষেত্রে নিঃসৃত প্রোটনের গতিশক্তি পরিমাপ করে $Q$-এর মান পাওয়া যায়

$$Q = -1{\cdot}26 \text{ মি-ই-ভো}$$

অপরপক্ষে (17·7) সমীকরণে ভর বর্ণালীবীক্ষণ দ্বারা পরিমিত বিভিন্ন পরমাণুর ভর বসিয়ে আমরা এক্ষেত্রে $Q$ নির্ণয় করিতে পারি :

$$\begin{aligned} Q &= M(N^{14}) + M(He^4) - M(O^{17}) - M(H^1) \\ &= 14{\cdot}007520 + 4{\cdot}003874 - 17{\cdot}004534 - 1{\cdot}008145 \\ &= 18{\cdot}011394 - 18{\cdot}012679 \\ &= -0{\cdot}001285 \; amu \\ &= -1{\cdot}19 \text{ মি-ই-ভো} \end{aligned}$$

উপরে প্রদত্ত $Q$-সংখ্যার দুটি মানের মধ্যে মোটামুটিভাবে সংগতি পাওয়া যায়।

যদি $Q$ পরিমাপ করা যায় এবং বিক্রিয়ায় অংশ গ্রহণকারী তিনটি কেন্দ্রকের ভর জানা থাকে তাহলে চতুর্থটির ভর নির্ণয় করা সম্ভব। সৃষ্ট কেন্দ্রক তেজস্ক্রিয় হলে এই পদ্ধতিতে ভর নির্ণয় করা বিশেষ সুবিধাজনক।

## 17·6 : নিউট্রন আবিষ্কার

কৃত্রিম উপায়ে কেন্দ্রক বিঘটন আবিষ্কৃত হওয়ার পরে রাদারফোর্ড এবং তাঁর সহকর্মী চ্যাড্‌উইক নাইট্রোজেন ছাড়া আরও নানারূপ হালকা পরমাণুর

কেন্দ্রক $\alpha$-কণিকার সাহায্যে বিঘটিত করতে সমর্থ হন, একথা পূর্বেই উল্লেখ করা হয়েছে। এইসব পরীক্ষায় বেশীর ভাগ ক্ষেত্রে বিঘটন প্রক্রিয়ার সময়ে তাঁরা প্রোটন নিঃসৃত হতে দেখেন। কিন্তু বেরিলিয়াম $(Z=4)$ মৌল নিয়ে অনুরূপ পরীক্ষা করার সময়ে প্রোটন নিঃসরণের কোন নিদর্শন পাওয়া যায় না।

১৯৩০ সালে বোথে এবং বেকার (Bothe and Becker) নামক জার্মান বিজ্ঞানীদ্বয় লক্ষ্য করেন যে $Be^9$ কেন্দ্রকের উপরে $\alpha$-কণিকা বর্ষণ করলে প্রোটনের পরিবর্তে এক প্রকার উচ্চ ভেদ্যতা (Penetrability) সম্পন্ন বিকিরণ নিঃসৃত হয়। তাঁরা অনুমান করেন যে এই বিকিরণ প্রকৃতপক্ষে $\gamma$-রশ্মি। বেরিলিয়াম ছাড়া বোরন $(Z=5)$ থেকেও অনুরূপ উচ্চ ভেদ্যতা সম্পন্ন বিকিরণ নিঃসৃত হবার নিদর্শন পাওয়া যায়। এই বিকিরণ বিভিন্ন পদার্থের মধ্যে কতটা শোষিত হয় তা পরিমাপ করে বোথে এবং বেকার এর শক্তি প্রায় 7 মি-ই-ভো পান। অর্থাৎ যে কোন প্রাকৃতিক তেজস্ক্রিয় পদার্থ নিঃসৃত $\gamma$-রশ্মি অপেক্ষা এই বিকিরণের শক্তি অনেক বেশী হয়।

এর পরে ১৯৩২ সালে প্রখ্যাত বিজ্ঞানী মাদাম কুরীর কন্যা আইরীন কুরী-জোলিও এবং তাঁর স্বামী অধ্যাপক জোলিও (Irene Curie-Joliot and Frederic Joliot) লক্ষ্য করেন যে এই বিকিরণ হাইড্রোজেন সম্বলিত পদার্থ ( যথা প্যারাফিন মোম ইত্যাদি ) থেকে উচ্চশক্তি প্রোটন নিঃসৃত করতে পারে। তাঁরা আরও লক্ষ্য করেন যে এই বিকিরণ চৌম্বক ক্ষেত্র দ্বারা বিচ্যুত হয় না। সুতরাং এই বিকিরণ কোন আহিত কণিকার রশ্মি হতে পারে না। এর দ্বারা নিঃসৃত প্রোটনের শক্তি পরিমাপ করে এবং এই বিকিরণ $\gamma$-রশ্মি এইরূপ অনুমান করে তাঁরা এর শক্তি নির্ণয় করেন।

তাঁরা অনুমান করেন যে এই বিকিরণ প্যারাফিন মোমের উপরে আপতিত হয়ে কম্পটন বিক্ষেপের অনুরূপ প্রক্রিয়ার দ্বারা প্রোটন নিঃসৃত করে। ইলেকট্রনের পরিবর্তে প্রোটন থেকে $E_0$ শক্তি সম্পন্ন $\gamma$-রশ্মির কম্পটন বিক্ষেপ বিবেচনা করলে সম্মুখ দিকে প্রতিক্ষিপ্ত (Recoil) প্রোটনের শক্তি পাওয়া যায় ( 14·5 সমীকরণ দ্রষ্টব্য ) ঃ

$$E_p=2E_0{}^2/M_pc^2$$

এখানে $M_p$ হচ্ছে প্রোটনের ভর। এখানে অনুমান করা হয়েছে যে $E_0 \leqslant M_p c^2/2$।

স্পষ্টতঃ প্রতিক্ষিপ্ত প্রোটনের শক্তি $E_p$ জানা থাকলে উপরের সমীকরণের সাহায্যে $\gamma$-ফোটনের শক্তি $E_0$ নির্ণয় করা যায়।

জোলিও দম্পতি নিঃসৃত প্রোটনের পথসীমা (Range) পরিমাপ করে এদের শক্তি নির্ণয় করেন $E_p = 4{\cdot}7$ মি-ই-ভো (প্রায়)। যেহেতু প্রোটনের স্থির-শক্তি (Rest Energy) $M_p c^2 \backsimeq 938$ মি-ই-ভো হয়, অতএব নিঃসৃত বিকিরণের শক্তি পাওয়া যায়

$$E_0 = \sqrt{E_p M_p c^2/2} = 47 \text{ মি-ই-ভো}$$

এরপরে চ্যাড্উইকের এক পরীক্ষা থেকে দেখা যায় যে এই উচ্চ ভেদ্যতা সম্পন্ন বিকিরণ নাইট্রোজেন যৌগ থেকে নাইট্রোজেনের কেন্দ্রক নিঃসৃত করে। নিঃসৃত নাইট্রোজেন কেন্দ্রকের শক্তি পরিমাপ করে এবং উপরে প্রদত্ত পদ্ধতিতে গণনা করে উক্ত বিকিরণের শক্তি স্বতন্ত্রভাবে নির্ণয় করা যায়। এইভাবে নির্ণীত শক্তির মান হয়

$$E_0 = 95 \text{ মি-ই-ভো}$$

উপরের আলোচনা থেকে দেখা যায় যে বোথে এবং বেকার কর্তৃক শোষণ-পরীক্ষার দ্বারা পরিমিত আলোচ্য অজ্ঞাত বিকিরণের শক্তি এবং জোলিও দম্পতি কর্তৃক প্রোটন প্রতিক্ষেপ পরীক্ষার দ্বারা নির্ণীত শক্তির মধ্যে কোন সংগতি পাওয়া যায় না। শুধু তাই নয়, প্রোটন প্রতিক্ষেপ এবং নাইট্রোজেন কেন্দ্রক প্রতিক্ষেপ পরীক্ষার দ্বারা স্বতন্ত্রভাবে নির্ণীত শক্তির মধ্যেও কোন সংগতি পাওয়া যায় না। তাছাড়া এই অজ্ঞাত বিকিরণকে $\gamma$-রশ্মি বলে অনুমান করলে ভর-শক্তি সমীকরণ থেকেও এর শক্তি নির্ণয় করা যায়। এই অনুমানের ভিত্তিতে $\alpha$-কণিকা এবং $Be^9$ কেন্দ্রকের মধ্যে বিক্রিয়ার সমীকরণ নিম্নলিখিত ভাবে লেখা যায়ঃ

$${}_4Be^9 + {}_2He^4 \longrightarrow {}_6C^{13*} \qquad {}_6C^{13} + \gamma$$

নিঃসৃত $\gamma$-রশ্মির শক্তি হবে

$$E_0 = M(Be^9)c^2 + M(He^4)c^2 + E_\alpha - M(C^{13})c^2$$

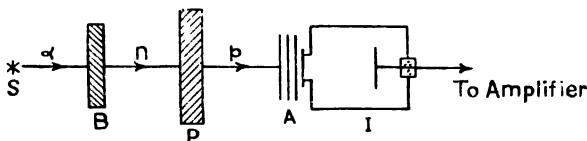
এখানে $C^{13}$ অবশিষ্ট কেন্দ্রকের গতিশক্তি উপেক্ষা করা হয়েছে। আপতিত

α-কণিকার শক্তি যদি $E_a = 5$ মি-ই-ভো $= 0·00536$ *amu* ধরা হয়, তাহলে পরমাণবিক ভরের এককে উপরোক্ত সমীকরণকে লেখা যায়

$$E_0 = 9·015046 + 4·003874 + ·00536 - 13·007478$$
$$= 0·016802 \; amu$$

যেহেতু 1 *amu* $= 931·2$ মি-ই-ভো, অতএব আমরা পাই

$$E_0 = 15·6 \text{ মি-ই-ভো}$$

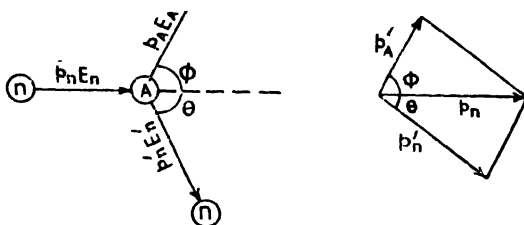
পূর্বোল্লিখিত পরিমিত মানসমূহের সংগে এই মানের অসংগতিও খুব প্রকটভাবে প্রতীয়মান হয়।

চিত্র 17·4

চ্যাড্‌উইকের নিউট্রন আবিষ্কার সম্পর্কিত পরীক্ষা ব্যবস্থা। S হচ্ছে α-উৎস ; B হচ্ছে একটি বেরিলিয়াম পাত ; P হচ্ছে প্যারাফিন মোমের প্লেট ; A হচ্ছে অ্যালুমিনিয়াম নির্মিত শোষক পাত ; I হচ্ছে আয়নন কক্ষ।

এই সমস্ত আপাত-বিরোধী পরীক্ষালব্ধ তথ্যগুলি ভালভাবে বিচার করে রাদারফোর্ডের সুযোগ্য ছাত্র চ্যাড্‌উইক (Sir James Chadwik) এক যুগান্তরকারী সিদ্ধান্তে উপনীত হন। ১৯৩২ সালে অনুষ্ঠিত এক পরীক্ষায় তিনি α-কণিকা এবং $Be^9$ কেন্দ্রকের মধ্যে কেন্দ্রক-বিক্রিয়ার ফলে নিঃসৃত উপরোক্ত অজ্ঞাত বিকিরণকে যথাক্রমে হাইড্রোজেন এবং নাইট্রোজেন সম্বলিত পদার্থের উপরে আপতিত করেন। তাঁর পরীক্ষা পদ্ধতি (17·4) চিত্রে প্রদর্শিত হয়েছে। উৎস S থেকে নিঃসৃত α-কণিকাগুলি B বেরিলয়াম পাত থেকে আলোচ্য অজ্ঞাত বিকিরণ নিঃসৃত করে। এই বিকিরণ P অবস্থানে রক্ষিত প্যারাফিন মোম থেকে স্থিতিস্থাপক সংঘাতের দ্বারা যে সব প্রোটন নিঃসৃত করে তাদের মধ্যে সম্মুখদিকে নিঃসৃত প্রোটনগুলিকে খুব সূক্ষ্ম পাত দ্বারা আচ্ছাদিত জানালার ভিতর দিয়ে I আয়নন-কক্ষের (Ionization Chamber) মধ্যে অনুপ্রবেশ করান হয়। আয়নন কক্ষের সগে সংযুক্ত একটি ইলেকট্রনিক পরিবর্ধক (Amplifier) এবং কম্পনবীক্ষণ (Oscilloscope)

যন্ত্রের সাহায্যে প্রোটনগুলির অনুপ্রবেশ নির্দেশিত হয়। আয়নন কক্ষের জানালার সামনে অ্যালুমিনিয়াম শোষকের পাত A স্থাপিত করে এদের পথসীমা পরিমাপ করা হয় এবং তার থেকে এদের শক্তি নির্ণয় করা হয়। পরে প্যারাফিন মোমের পরিবর্তে নাইট্রোজেন সম্বলিত পদার্থ ব্যবহার করে অনুরূপ পরিমাপ করা হয়।

চ্যাড্‌উইক দেখান যে অজ্ঞাত বিকিরণকে যদি $\gamma$-রশ্মি মনে না করে প্রোটনের সমান ভর সম্পন্ন এক প্রকার আধানহীন কণিকা বলে অনুমান করা হয়, তাহলে নিঃসৃত প্রোটন এবং নাইট্রোজেন কেন্দ্রকের পরিমিত গতিশক্তির মান সহজেই ব্যাখ্যা করা যায়। এই আধানহীন কণিকার নাম দেওয়া হয় 'নিউট্রন' (Neutron) এবং চ্যাড্‌উইক অনুমান করেন যে এই কণিকাগুলি স্থিতিস্থাপক সংঘাতের দ্বারা বিভিন্ন প্রকার কেন্দ্রক (যথা প্রোটন বা নাইট্রোজেন) নিঃসৃত করে।

শক্তি এবং ভরবেগ সংরক্ষণ সূত্র প্রয়োগ করে নিঃসৃত কেন্দ্রকের শক্তি

চিত্র 17·5

পরমাণু কেন্দ্রকের সংগে নিউট্রনের স্থিতিস্থাপক সংঘাতকালে ভরবেগ সংরক্ষণ চিত্র।

নির্ণয় করা যায়। (17·5) চিত্রে নিউট্রন এবং অন্য একটি কেন্দ্রকের মধ্যে স্থিতিস্থাপক সংঘাতের নকশা প্রদর্শিত হয়েছে। মনে করা যাক যে $M_n$, $E_n$ এবং $p_n$ হচ্ছে যথাক্রমে আপতিত নিউট্রনের ভর, শক্তি এবং ভরবেগ। A কেন্দ্রকের সংগে স্থিতিস্থাপক সংঘাত লাভ করে নিউট্রনটি $\theta$ কোণে বিক্ষিপ্ত হয় এবং A কেন্দ্রকটি $\phi$ কোণে প্রতিক্ষিপ্ত হয় বলে ধরা যাক। যদি A কেন্দ্রকের ভর $M_A$ হয় এবং সংঘাতের পরে নিউট্রন এবং A কেন্দ্রকের শক্তি

ও ভরবেগ হয় যথাক্রমে $E'_n$, $p'_n$ এবং $E'_A$, $p'_A$, তাহলে শক্তি-সংরক্ষণ সূত্র অনুযায়ী আমরা লিখতে পারি ঃ

$$E_n = E'_n + E'_A \qquad (17{\cdot}13)$$

নিউট্রনের আপতন পথ অভিমুখে ভরবেগ-সংরক্ষণ সূত্র প্রয়োগ করলে আমরা পাই ঃ

$$p_n = p'_n \cos\theta + p'_A \cos\phi \qquad (17{\cdot}14)$$

আপতন পথের অভিলম্বে ভরবেগ সংরক্ষণ সূত্র প্রয়োগ করে পাওয়া যায়

$$0 = p'_n \sin\theta - p'_A \sin\phi \qquad (17{\cdot}15)$$

(17·14) এবং (17.15) সমীকরণদ্বয় থেকে বর্গ নির্ণয় করে যোগ করলে পাওয়া যায়

$$p'^2_n = p_n^2 + p'^2_A - 2p_n p'_A \cos\phi$$

যেহেতু A কেন্দ্রকটি সম্মুখদিকে প্রতিক্ষিপ্ত হয়, অতএব $\phi = 0$ হয়। অতএব আমরা পাই

$$p'^2_n = p_n^2 + p'^2_A - 2p_n p'_A$$

সুতরাং ভরবেগ এবং গতিশক্তির মধ্যেকার সম্পর্ক ব্যবহার করে আমরা পাই

$$M_n E'_n = M_n E_n + M_A E'_A - 2\sqrt{M_n M_A E_n E'_A} \qquad (17{\cdot}16)$$

(17·13) এবং (17·16) সমীকরণ থেকে পাওয়া যায়

$$2\sqrt{M_n M_A E_n E'_A} = M_n E_n + M_A E'_A - M_n(E_n - E'_A)$$
$$= (M_A + M_n)E'_A \qquad (17{\cdot}17)$$

(17·17) সমীকরণ থেকে বর্গ নির্ণয় করে অবশেষে আমরা পাই

$$E'_A = \frac{4M_A M_n}{(M_A + M_n)^2} E_n \qquad (17{\cdot}18)$$

যদি আপতিত নিউট্রনের বেগ $v_n$ হয় এবং প্রতিক্ষিপ্ত A কেন্দ্রকের বেগ $v_A$ হয়, তাহলে (17·18) সমীকরণ থেকে পাওয়া যায়

$$\tfrac{1}{2} M_A v_A^2 = \frac{4M_A M_n}{(M_A + M_n)^2} \; \tfrac{1}{2} M_n v_n^2$$

অতএব
$$v_A = \frac{2M_n v_n}{M_A + M_n} \qquad (17{\cdot}19)$$

পূর্বেই উল্লেখ করা হয়েছে যে চ্যাড্‌উইক হাইড্রোজেন সম্বলিত পদার্থ থেকে নিঃসৃত প্রোটনের পথসীমা পরিমাপ করেন। এর থেকে তিনি সম্মুখদিকে নিঃসৃত প্রোটনের বেগ পান $v_p = 3{\cdot}3 \times 10^9$ সেমি/সেকেণ্ড।

ফেদার (N. Feather) নামক বৃটিশ বিজ্ঞানী মেঘ-কক্ষের সাহায্যে নিউট্রনের সংগে সংঘাতের ফলে প্রতিক্ষিপ্ত নাইট্রোজেন কেন্দ্রকের ($N^{14}$) পথসীমা (Range) পরিমাপ করেন। এর থেকে সম্মুখদিকে নিঃসৃত $N^{14}$ কেন্দ্রকের বেগ পাওয়া যায় $v_N = 4{\cdot}7 \times 10^8$ সেমি/সেকেণ্ড।

সুতরাং (17·19) সমীকরণ ব্যবহার করে আমরা লিখতে পারি

$$v_p = \frac{2M_n v_n}{M_n + 1} = 3{\cdot}3 \times 10^9$$

$$v_N = \frac{2M_n v_n}{M_n + 14} = 4{\cdot}7 \times 10^8$$

এখানে $M_p$ এবং $M_N$ যথাক্রমে 1 *amu* এবং 14 *amu* ধরা হয়েছে। অতএব আমরা পাই

$$v_p/v_N = \frac{M_n + 14}{M_n + 1} = \frac{33}{4{\cdot}7} \simeq 7$$

অতএব $$M_n = 7/6 = 1{\cdot}17 \; amu$$

$$v_n = 3{\cdot}05 \times 10^9 \text{ সেমি/সেকেণ্ড}$$

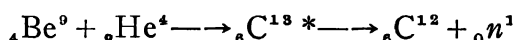
এইভাবে চ্যাড্‌উইক সংশয়াতীত ভাবে প্রমাণ করেন যে $\alpha$-কণিকার সংগে সংঘাতের ফলে $Be^9$ বা $B^{11}$ কেন্দ্রক থেকে যে উচ্চ ভেদ্যতা সম্পন্ন আধানহীন বিকিরণ নিঃসৃত হয়, তা $\gamma$-রশ্মি নয়; তা হচ্ছে প্রোটনের সংগে প্রায় সমভর সম্পন্ন একপ্রকার আধানহীন কণিকা। চ্যাড্‌উইক কর্তৃক নিউট্রন আবিষ্কারের ফলে বহু বৎসর পূর্বে এইরূপ কণিকার অস্তিত্ব সম্পর্কে রাদারফোর্ড যে অনুমান করেছিলেন তা দৃঢ়ভাবে প্রতিষ্ঠিত হয়। এই যুগান্তরকারী আবিষ্কারের জন্য চ্যাড্‌উইক ১৯৩৫ সালে নোবেল পুরস্কার প্রাপ্ত হন।

## 17·7 : নিউট্রনের ভর নির্ণয়

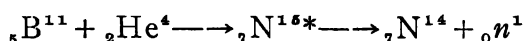
চ্যাড্‌উইক কর্তৃক প্রাথমিক ভাবে পরিমিত নিউট্রনের ভরের উপরে প্রদত্ত মান খুবই ত্রুটিপূর্ণ ছিল। পরে আরও অনেক সঠিক ভাবে নিউট্রনের ভর নিরূপণ করা হয়।

যেহেতু নিউট্রন একটি আধানহীন কণিকা, অতএব তড়িৎক্ষেত্রে এবং চৌম্বক ক্ষেত্রে এর কোন বিচ্যুতি ঘটে না। সুতরাং সাধারণ ভর বর্ণালীমাপক যন্ত্র দ্বারা নিউট্রনের ভর নির্ণয় করা সম্ভব নয়। নিউট্রন দ্বারা কেন্দ্রক বিক্রিয়া অনুষ্ঠিত করে ভর ও শক্তির সমতা সূত্র থেকে এর ভর নির্ণয় করা যেতে পারে।

$\alpha$-কণিকার দ্বারা $Be^9$ কেন্দ্রক বিঘটন কালে নিউট্রন নিঃসৃত হয় ধরে নিলে উক্ত কেন্দ্রক বিঘটন প্রক্রিয়াকে নিম্নলিখিত সমীকরণ দ্বারা নির্দেশিত করা যায়ঃ

$$_4Be^9 + {}_2He^4 \longrightarrow {}_6C^{13*} \longrightarrow {}_6C^{12} + {}_0n^1$$

অর্থাৎ বিঘটনের ফলে নিউট্রন নিঃসৃত হবার পর পড়ে থাকে $C^{12}$ অবশিষ্ট কেন্দ্রকটি।

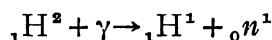
অনুরূপে বোরনের বিঘটন নিম্নলিখিত ভাবে নির্দেশিত করা যায়ঃ

$$_5B^{11} + {}_2He^4 \longrightarrow {}_7N^{15*} \longrightarrow {}_7N^{14} + {}_0n^1$$

এই কেন্দ্রক-বিক্রিয়ার ক্ষেত্রে শক্তি-সংরক্ষণ সূত্র প্রয়োগ করে আমরা পাই

$$M(B^{11}) + M(He^4) + E_\alpha = M(N^{14}) + M_n + E_N + E_n$$

সে সময়ে বিভিন্ন পরমাণুর যে ভর জানা ছিল তা ব্যবহার করে এবং $E_\alpha$, $E_N$ ও $E_n$ সংখ্যাগুলির মান বসিয়ে উপরোক্ত সমীকরণ থেকে চ্যাড্‌উইক নিউট্রনের ভর নির্ণয় করেন। নিউট্রনের শক্তি নির্ণয় করার জন্য তিনি প্রোটন প্রতিক্ষেপ (Proton Recoil) পরীক্ষা অনুষ্ঠিত করেন। প্রোটন এবং নিউট্রনের ভর প্রায় সমান ধরে নিয়ে এবং সম্মুখদিকে প্রতিক্ষিপ্ত প্রোটনের পথসীমা পরিমাপ করে তিনি নিউট্রনের গতিশক্তি $E_n$ নির্ণয় করেন। এই পদ্ধতিতে তিনি নিউট্রনের ভর $1{\cdot}0067\ amu$ পান।

পরে চ্যাড্‌উইক এবং গোল্‌ড্‌হাবের (Goldhaber) $\gamma$-রশ্মির সাহায্যে ডয়টেরন ($H^2$) বিঘটিত করে খুব সঠিকভাবে নিউট্রনের ভর নির্ণয় করেনঃ

$$_1H^2 + \gamma \rightarrow {}_1H^1 + {}_0n^1$$

এই প্রক্রিয়ার ক্ষেত্রে শক্তি এবং ভরবেগ সূত্র প্রয়োগ করে নিউট্রনের ভর পাওয়া যায়। উপরোক্ত পরীক্ষায় ThC″ নিঃসৃত $2{\cdot}62$-মি-ই-ভো শক্তি সম্পন্ন $\gamma$-রশ্মি ব্যবহার করা হয়। এই $\gamma$-ফোটনের ভরবেগ হচ্ছে

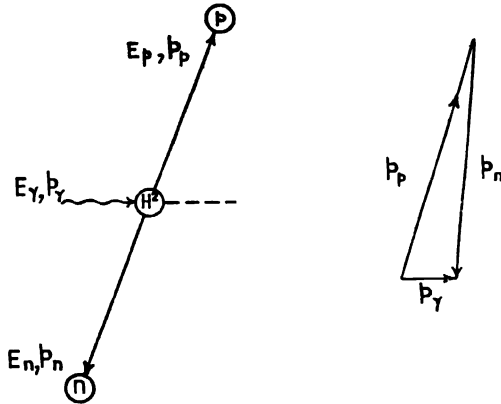
$$p_\gamma = \frac{h\nu}{c} = 0{\cdot}14 \times 10^{-15} \text{ গ্রাম-সেমি/সেকেণ্ড}$$

শক্তি-সংরক্ষণ সূত্র অনুযায়ী আমরা লিখতে পারি

$$M(H^2)+E_\gamma=M(H^1)+M_n+E_p+E_n \qquad (17\cdot20)$$

(17·20) সমীকরণে ভর এবং শক্তি সবই পরমাণবিক ভরের এককে ধরা হয়েছে। বিঘটনের ফলে নিঃসৃত প্রোটনের গতিশক্তি $E_p=0\cdot225$ মি-ই-ভো পাওয়া যায়। এইরূপ শক্তি সম্পন্ন প্রোটনের ভরবেগ হয়

$$p_p=\sqrt{2M_pE_p}=\sqrt{2\times1\cdot66\times10^{-24}\times0\cdot225\times1\cdot6\times10^{-6}}$$
$$\simeq1\cdot1\times10^{-15} \text{ গ্রাম-সেমি/সেকেণ্ড}$$

অর্থাৎ $p_p \gg p_\gamma$ হয়। সুতরাং নিউট্রনের ভরবেগ $p_n$ এমন হওয়া প্রয়োজন যে এর সংগে ভেক্টর পদ্ধতিতে প্রোটনের ভরবেগ সংযোজন করলে যে লব্ধি $p_\gamma$ পাওয়া যায় তার মান $p_p$ বা $p_n$ এর তুলনায় খুব কম হয়। (17·6)

চিত্র 17·6

$\gamma$-রশ্মির দ্বারা ডয়টেরন বিঘটনের ভরবেগ সংরক্ষণ চিত্র।

চিত্রে এই ভেক্টর সংযোজন প্রদর্শিত হয়েছে। চিত্র থেকে প্রতীয়মান হয় যে $p_p$ এবং $p_n$ ভেক্টর দুটি পরস্পরের প্রায় সমান এবং বিপরীতমুখী না হলে এইরূপ হওয়া সম্ভব নয়। অতএব আমরা পাই $p_p=p_n$ এবং

$$E_p=E_n=0\cdot225 \text{ মি-ই-ভো}$$
$$=0\cdot0002416\ amu$$

আবার $\quad E_\gamma=2\cdot62$ মি-ই-ভো $=0\cdot002814\ amu$

সুতরাং (17·20) সমীকরণ থেকে আমরা পাই

$$M_n = M(\mathrm{H}^2) - M(\mathrm{H}^1) + E_\gamma - E_p - E_n$$
$$= 2·01474 - 1·00814 + 0·002814 - 0·0004832$$
$$= 1·008931 \ amu$$

পরবর্তী যুগে উপরোক্ত পদ্ধতিতে নিউট্রনের ভর আরও সঠিক ভাবে পরিমাপ করা হয়েছে। বর্তমানে সার্বিক ভাবে গৃহীত নিউট্রনের ভর হচ্ছে

$$M_n = 1·008986 \ amu$$

নিউট্রনের ভর প্রোটনের ভর অপেক্ষা কিছু বেশী। পূর্বেই উল্লেখ করা হয়েছে যে নিউট্রন এবং প্রোটন এই দুই প্রকার কণিকাই হচ্ছে পরমাণু কেন্দ্রক গঠনের উপাদান। কেন্দ্রকের মধ্যে এরা দৃঢ় সংবদ্ধ অবস্থায় বর্তমান থাকে। কেন্দ্রক বিক্রিয়ার সময়ে বহিরাগত কণিকার সংঘাতে কোন কোন ক্ষেত্রে কেন্দ্রক থেকে নিউট্রন নিঃসৃত হয়। কেন্দ্রকের বাইরে মুক্ত অবস্থায় নিউট্রন $\beta^-$ বিঘটনশীল হয় ( 16·9 অনুচ্ছেদ দ্রষ্টব্য )। নিউট্রনের অন্যান্য ধর্মাবলীর কথাও (16·9) অনুচ্ছেদে আলোচনা করা হয়েছে।

নিউট্রনের সাহায্যে কেন্দ্রক বিক্রিয়া অনেক সহজে সংঘটিত হতে পারে। প্রোটন, ডয়টেরন, $\alpha$-কণিকা প্রভৃতি ধনাত্মক আহিত কণিকাগুলি কেন্দ্রক দ্বারা বিকৃষ্ট হয়। ফলে এরা যথেষ্ট উচ্চশক্তি সম্পন্ন না হলে কেন্দ্রকের মধ্যে প্রবেশ করতে পারে না। আধানহীন হওয়ার ফলে নিউট্রন কিন্তু খুব সহজেই কেন্দ্রকের মধ্যে প্রবেশ করে কেন্দ্রক রূপান্তর সংঘটিত করতে পারে। এ সম্বন্ধে (17·14) অনুচ্ছেদে আলোচনা করা হবে।

## 17·8 : কক্রফ্‌ট এবং ওয়াল্‌টনের পরীক্ষা

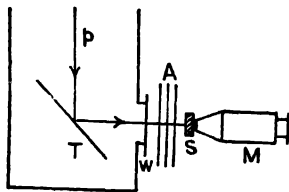
রাদারফোর্ড কর্তৃক কৃত্রিম উপায়ে কেন্দ্রক রূপান্তর আবিষ্কৃত হওয়ার পরে একথা প্রতীয়মান হয় যে কেন্দ্রক বিক্রিয়া সংঘটনের উদ্দেশ্যে $\alpha$-কণিকা ব্যবহারের উপযোগিতা খুবই সীমিত। যেহেতু $\alpha$-কণিকাগুলি দুই ইলেকট্রনীয় একক পরিমাণ ধনাত্মক আধান বহন করে অতএব এদের উপরে বিভিন্ন কেন্দ্রকের, বিশেষতঃ ভারী ( উচ্চ $Z$ সম্পন্ন ) কেন্দ্রকসমূহের বিকর্ষণী প্রভাব অপেক্ষাকৃত অনেক বেশী। ফলে প্রাকৃতিক তেজস্ক্রিয় পদার্থ নিঃসৃত কয়েক মিলিয়ন $(10^6)$ ইলেকট্রন ভোল্ট শক্তি সম্পন্ন $\alpha$-কণিকাগুলি কেবল অপেক্ষাকৃত হালকা ( নিম্ন $Z$ সম্পন্ন ) কেন্দ্রকের মধ্যে প্রবেশ করে

সেগুলিকে বিঘটিত করতে পারে। স্পষ্টতঃ এক ইলেকট্রনীয় আধান সম্পন্ন প্রোটনকে প্রক্ষিপ্ত কণিকা (Projectile) হিসাবে ব্যবহার করতে পারলে এই অসুবিধা অনেকটা হ্রাস করা সম্ভব।

তাছাড়া প্রাকৃতিক তেজস্ক্রিয় পদার্থ থেকে প্রাপ্ত α-কণিকার সংখ্যাও সীমিত হয়। এক গ্রাম রেডিয়াম থেকে প্রতি সেকেণ্ডে $3{\cdot}7 \times 10^{10}$ α-কণিকা নিঃসৃত হয়। এই কণিকাগুলি উৎস থেকে সকল দিকে নির্গত হয়। কোন নির্দিষ্ট দিকে কণিকার নির্গমন হার স্পষ্টতঃ অনেক কম হয়। ইতিপূর্বে আলোচিত ব্ল্যাকেটের পরীক্ষা থেকে দেখা যায় যে একটি কেন্দ্রক এবং একটি α-কণিকার মধ্যে সংঘাতের সম্ভাব্যতা খুবই কম—প্রতি পঞ্চাশ সহস্রে এক ভাগ বা আরও কম। স্পষ্টতঃ আপতিত কণিকার সংখ্যা যত বৃদ্ধি করা যায় তত বেশী সংখ্যক কেন্দ্রক বিঘটন অনুষ্ঠিত হতে পারে। উপযুক্ত ব্যবস্থা অবলম্বন করে আয়ন উৎসের মধ্যে হাইড্রোজেন গ্যাস আয়নিত করতে পারলে তার থেকে ইচ্ছামত অনেক বেশী সংখ্যক প্রোটন পাওয়া যেতে পারে। এই প্রোটনগুলিকে কোন উপায়ে যদি উচ্চ শক্তি সম্পন্ন করা যায়, তাহলে তাদের প্রক্ষিপ্ত কণিকা হিসাবে ব্যবহার করে নানারূপ কেন্দ্রক বিক্রিয়া পর্যবেক্ষণ করা সম্ভব।

রাদারফোর্ডের দুই সহকর্মী, কক্রফ্‌ট এবং ওয়াল্‌টন (Cockroft and Walton) ১৯৩২ সালে, অর্থাৎ যে বৎসর চ্যাড্‌উইক নিউট্রন আবিষ্কার করেন সেই বৎসরে, একটি কণিকা ত্বরণযন্ত্র (Particle Accelerator) উদ্ভাবিত করে তার সাহায্যে উচ্চশক্তি প্রোটনগুচ্ছ উৎপন্ন করেন। এই প্রোটনগুলির সাহায্যে তাঁরা $Li^7$ কেন্দ্রক বিঘটন করতে সমর্থ হন। এইভাবে তাঁরা সর্বপ্রথম কৃত্রিম উপায়ে ত্বরিত (Accelerated) আহিত কণিকার সাহায্যে কেন্দ্রক রূপান্তর অনুষ্ঠিত করেন।

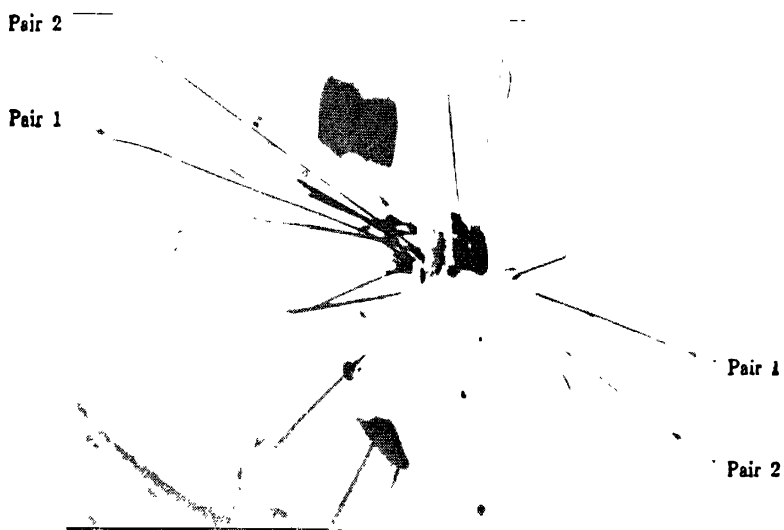
কক্রফ্‌ট-ওয়াল্‌টন বিভব উৎপাদক (Voltage Generator) যন্ত্রের গঠন এবং কার্যপ্রণালী সম্বন্ধে (18·2) অনুচ্ছেদে আলোচনা করা হবে। সংক্ষেপে বলা যেতে পারে যে, এই যন্ত্রে একটি ট্র্যান্সফর্মার থেকে প্রাপ্ত উচ্চমানের পরিবর্তী বিভব কতকগুলি একমুখীকারক (Rectifier) এবং ধারক (Condensers) ব্যবহার করে একমুখীকৃত এবং পরিবর্ধিত করা হয়। কক্রফ্‌ট এবং ওয়াল্‌টন 700,000 ভোল্ট পর্যন্ত উচ্চ বিভব উৎপাদন করতে সমর্থ হন। যখন একগুচ্ছ প্রোটন এই বিভব প্রভেদের মধ্য দিয়ে এক তড়িৎদ্বার থেকে অন্য তড়িৎদ্বার পর্যন্ত পরিভ্রমণ করে, তখন

তারা 0·7 মি-ই-ভো ( $7 \times 10^5$ ই-ভো ) পর্যন্ত শক্তি অর্জন করে। খুব নিম্ন বায়ুচাপ সম্পন্ন উৎপাদক যন্ত্রের অভ্যন্তরে এক প্রান্তে অবস্থিত লিথিয়াম

চিত্র 17·7

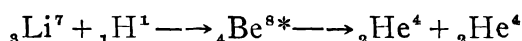
প্রোটন দ্বারা লিথিয়াম কেন্দ্রক রূপান্তর উৎপাদনের জন্য কক্রফ্‌ট এবং ওয়াল্‌টনের পরীক্ষা ব্যবস্থা।

বা অনুরূপ কোন লক্ষ্যবস্তুর উপরে এইরূপ উচ্চশক্তি সম্পন্ন প্রোটনগুচ্ছকে আপতিত করিয়ে উক্ত লক্ষ্যবস্তুর কেন্দ্রক বিঘটন সংঘটিত করা সম্ভব হয় ( 17·7 চিত্র দ্রষ্টব্য )।

কক্রফ্‌ট এবং ওয়াল্‌টন তাঁদের পরীক্ষায় সাধারণতঃ 0·5 মি-ই-ভো শক্তি সম্পন্ন প্রোটনগুচ্ছ ব্যবহার করেন। লিথিয়াম লক্ষ্যের (Target) উপরে প্রায় $10^{-6}$ অ্যাম্পিয়ার প্রোটন-প্রবাহ (Proton Current) আপতিত করা হয়। যেহেতু প্রত্যেক প্রোটন $1.6 \times 10^{-19}$ কুলম্ব পরিমাণ আধান বহন করে, অতএব লিথিয়াম লক্ষ্যের উপরে প্রতি সেকেণ্ডে প্রায় $6.25 \times 10^{12}$ সংখ্যক প্রোটন আপতিত করা হয়।

প্রোটন বর্ষণের ফলে লিথিয়াম লক্ষ্যবস্তু T থেকে এক প্রকার আহিত কণিকা নিঃসৃত হতে দেখা যায়। এই কণিকাগুলি একটি পাতলা অভ্র-পাত দ্বারা আচ্ছাদিত W জানালার মধ্য দিয়ে উৎপাদক যন্ত্রের ত্বরণ নল থেকে নির্গত হয়ে ZnS লিপ্ত S প্রতিপ্রভ পর্দার উপরে আপতিত হয় এবং দীপ্তির চমক উৎপন্ন করে। M অণুবীক্ষণের সাহায্যে এই চমকগুলি (Scintillations) নিরীক্ষণ করা যায়। প্রতিপ্রভ পর্দার সম্মুখে কোন শোষক পদার্থের পাত A স্থাপিত করে কণিকাগুলির পথসীমা (Range) এবং তার থেকে এদের শক্তি নির্ণয় করা যায়। এইভাবে উৎপন্ন দীপ্তির চমক নিরীক্ষণ করে এবং নিঃসৃত কণিকাগুলির পথসীমা পরিমাপ করে কক্রফ্‌ট এবং ওয়াল্‌টন নিশ্চিতভাবে সিদ্ধান্ত করেন যে এই নিঃসৃত কণিকাগুলি হচ্ছে α-কণিকা।

চিত্র 17·8
প্রোটন দ্বারা লিথিয়াম কেন্দ্রক বিঘটনের মেঘকক্ষ চিত্র।

লিথিয়াম কেন্দ্রকের সংগে প্রোটনের সংঘাতের ফলে যে কেন্দ্রক বিক্রিয়া ঘটে তা নিম্নলিখিত সমীকরণ দ্বারা নির্দেশিত করা যায় ঃ

$$_3Li^7 + {_1H^1} \longrightarrow {_4Be^{8*}} \longrightarrow {_2He^4} + {_2He^4}$$

পরবর্তী কালে ডী এবং ওয়াল্‌টন (Dee and Walton) একটি উইলসন মেঘ-কক্ষের মধ্যে স্থাপিত লিথিয়াম লক্ষ্যের উপরে 0·25 মি-ই-ভো প্রোটনগুচ্ছ আপতিত করে উপরোক্ত বিক্রিয়া অনুষ্ঠিত করেন এবং নিঃসৃত α-কণিকা দুটির ভ্রমণপথের আলোকচিত্র গ্রহণ করেন। (17·8) চিত্রে প্রদর্শিত এই আলোকচিত্র থেকে দেখা যায় যে দুটি α-কণিকার পথসীমা সমান হয়। এই পথসীমা পরিমাপ করে এদের প্রত্যেকটির শক্তির মান পাওয়া যায় প্রায় 8·6 মি-ই-ভো। উপরে প্রদত্ত কেন্দ্রক বিক্রিয়া সমীকরণে শক্তি-সংরক্ষণ সূত্র প্রয়োগ করে পাওয়া যায়

$$M(Li^7) + M_H + E_p = 2M(He^4) + 2E_\alpha$$

সুতরাং $Q = 2E_\alpha - E_p = M(Li^7) + M_H - 2M(He^4)$

উপরে প্রদত্ত সমীকরণে বিভিন্ন কণিকার শক্তির মান বসালে আলোচ্য বিক্রিয়ার $Q$ পাওয়া যায়

$$Q = 2E_\alpha - E_p = 2 \times 8{\cdot}6 - 0{\cdot}25 = 16{\cdot}95 \text{ মি-ই-ভো}$$

আরও সঠিক ভাবে পরিমাপ করে পাওয়া যায় $Q = 17{\cdot}33$ মি-ই-ভো।

অপরপক্ষে $Li^7$, প্রোটন এবং α-কণিকার ভর থেকেও উপরোক্ত কেন্দ্রক-বিক্রিয়ার $Q$ নির্ণয় করা যায় ঃ

$$\begin{aligned} Q &= M(Li^7) + M_H - 2M(He^4) \\ &= 7{\cdot}018232 + 1{\cdot}008145 - 2 \times 4{\cdot}003874 \\ &= 0{\cdot}018629 \; amu \end{aligned}$$

এই সংখ্যাকে 931·2 দিয়ে গুণ করে আমরা পাই $Q = 17{\cdot}34$ মি-ই-ভো। উপরে প্রদত্ত দুই বিভিন্ন পদ্ধতিতে নির্ণীত $Q$-সংখ্যার মান পরস্পরের সংগে খুব ভাল ভাবে মিলে যায়। বস্তুতঃ কক্রফ্‌ট্‌-ওয়াল্‌টনের উপরে বর্ণিত পরীক্ষা থেকেই সর্বপ্রথম আইনষ্টাইনের ভর-শক্তি সমতা সূত্রের যাথার্থ্য প্রমাণিত হয়।

এখানে উল্লেখযোগ্য যে বিঘটনের ফলে সৃষ্ট α-কণিকা দুটির গতিশক্তি আপতিত প্রোটনের গতিশক্তি অপেক্ষা অনেক বেশী হয়। ফলে এদের ভরবেগও আপতিত প্রোটনের ভরবেগের তুলনায় অনেক বেশী হয়। ভরবেগ-

সংরক্ষণ সূত্র অনুযায়ী এইরূপ ক্ষেত্রে $\alpha$-কণিকা দুটি পরস্পরের প্রায় বিপরীত দিকে নিঃসৃত হয়। (17·8) চিত্রে এইরূপ বিপরীতমুখী দুটি $\alpha$-কণিকার ভ্রমণপথের (Track) আলোকচিত্র দেখা যায়।

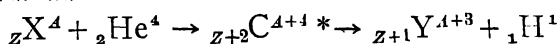
লিথিয়াম ছাড়া আরও কয়েক প্রকার হালকা পরমাণুর উপরে প্রোটনগুচ্ছ আপতিত করে কক্রফ্‌ট এবং ওয়াল্‌টন এইসব পরমাণুর কেন্দ্রক বিঘটন অনুষ্ঠিত করেন। প্রত্যেক ক্ষেত্রে পরিমিত $Q$ এবং পরমাণবিক ভর থেকে নির্ণীত $Q$-এর মধ্যে ভাল সংগতি পাওয়া যায়। এই সব পরীক্ষা থেকে আইনষ্টাইনের ভর-শক্তি সমতা সূত্র দৃঢ়ভাবে সমর্থিত হয়।

এখানে উল্লেখযোগ্য যে কক্রফ্‌ট-ওয়াল্‌টন কণিকা-ত্বরণ যন্ত্রের সাহায্যে এক মিলিয়ন ($10^6$) ভোল্ট অপেক্ষা খুব বেশী উচ্চতর বিভব উৎপন্ন করা শক্ত। সুতরাং এই যন্ত্রের সাহায্যে সাধারণতঃ এক মি-ই-ভো অপেক্ষা বেশী শক্তি সম্পন্ন প্রোটন বা ডয়টেরন এবং দুই মি-ই-ভো অপেক্ষা বেশী শক্তি সম্পন্ন $\alpha$-কণিকা পাওয়া যায় না। এইসব কণিকার সাহায্যে অপেক্ষাকৃত হালকা ( অর্থাৎ নিম্ন $Z$ সম্পন্ন ) কেন্দ্রক বিঘটিত করা সম্ভবপর হলেও ভারী ( অর্থাৎ উচ্চ $Z$ সম্পন্ন ) কেন্দ্রকসমূহ বিঘটনের জন্য আরও অনেক উচ্চতর শক্তি সম্পন্ন কণিকার প্রয়োজন হয়। তাছাড়া শক্তি-গ্রাহী (Endoergic) কেন্দ্রক বিক্রিয়া সংঘটিত করার জন্যও যথেষ্ট উচ্চতর শক্তি সম্পন্ন কণিকার প্রয়োজন হয়। এইসব কারণে বর্তমানে নানারূপ উচ্চ শক্তি সম্পন্ন ত্বরণযন্ত্র উদ্ভাবিত হয়েছে, যথা ভ্যান্‌-ডে-গ্রাফ্‌ উৎপাদক (Van-de Graff Generator), রৈখিক ত্বরণযন্ত্র (Linear Accelerator), সাইক্লোট্রন (Cyclotron), বীটাট্রন (Betatron), ইলেকট্রন এবং প্রোটন সিংক্রোট্রন (Synchrotron) ইত্যাদি। এইসব যন্ত্রের সাহায্যে কয়েক সহস্র মিলিয়ন ($10^9$) ইলেকট্রন-ভোল্ট অর্থাৎ কয়েক জি-ই-ভো পর্যন্ত শক্তি সম্পন্ন বিভিন্ন প্রকার আহিত কণিকাগুচ্ছ পাওয়া যায়। এইরূপ উচ্চশক্তি কণিকার সাহায্যে শুধু যে নানাবিধ কেন্দ্রক বিক্রিয়া সম্পর্কিত পরীক্ষা অনুষ্ঠিত করা সম্ভব তাই নয়, এইসব কণিকা ব্যবহার করে বিভিন্ন প্রকার মৌলিক কণিকা (Fundamental Particles) উৎপন্ন করে তাদের ধর্মাবলী নিরূপণ করা যায়।

### 17·9 : $\alpha$-কণিকার দ্বারা সংঘটিত কেন্দ্রক বিক্রিয়া

প্রাকৃতিক তেজস্ক্রিয় পদার্থ নিঃসৃত $\alpha$-কণিকার সাহায্যে রাদারফোর্ড কী ভাবে সর্বপ্রথম কৃত্রিম উপায়ে কেন্দ্রক রূপান্তর আবিষ্কার করেন সে সম্বন্ধে

(17·1) অনুচ্ছেদে আলোচনা করা হয়েছে। রাদারফোর্ড কর্তৃক অনুষ্ঠিত এই কেন্দ্রক বিক্রিয়াকে (α, $p$) জাতীয় কেন্দ্রক বিক্রিয়া আখ্যা দেওয়া যায়। কারণ এক্ষেত্রে কেন্দ্রক বিক্রিয়ার ফলে নিঃসৃত কণিকাটি হচ্ছে একটি প্রোটন। সাধারণভাবে এই জাতীয় কেন্দ্রক বিক্রিয়াকে নিম্নলিখিত সমীকরণ দ্বারা নির্দেশিত করা যায়ঃ

$$_{Z}X^{A}+{}_{2}He^{4}\rightarrow {}_{Z+2}C^{A+4}*\rightarrow {}_{Z+1}Y^{A+3}+{}_{1}H^{1}$$

এক্ষেত্রে (17·7$a$) সমীকরণ অনুযায়ী আমরা পাই

$$Q(\alpha, p)=B(Y^{A+3})-B(X^{A})-B_{\alpha}$$

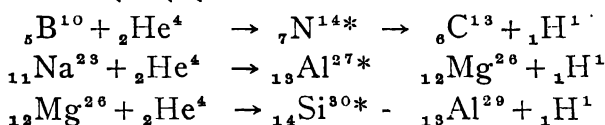
লক্ষ্য কেন্দ্রক খুব হালকা না হলে বেশীর ভাগ কেন্দ্রকের বন্ধন শক্তি ভর-সংখ্যার সমানুপাতিক হয়; অতএব আমরা লিখতে পারি

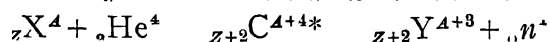
$$B(Y^{A+3})\approx(A+3)f_{B} \text{ এবং } B(X^{A})\approx Af_{B}$$

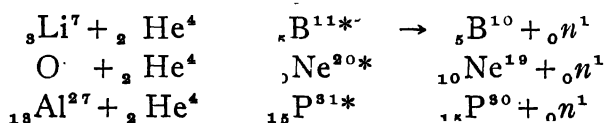
এখানে $f_B$ প্রায় 8 মি-ই-ভো হয়। সুতরাং আমরা পাই

$$Q(\alpha, p)\sim 3f_{B}-B_{\alpha}\approx 3\times 8-28=-4 \text{ মি-ই-ভো}$$

অর্থাৎ (α, $p$) জাতীয় কেন্দ্রক বিক্রিয়া সাধারণতঃ শক্তি-গ্রাহী (Endoergic) হয়; অর্থাৎ এক্ষেত্রে $Q<0$ হয়। এই জাতীয় বিক্রিয়ার অন্যান্য কয়েকটি উদাহরণ হচ্ছেঃ

$$_{5}B^{10}+{}_{2}He^{4}\rightarrow {}_{7}N^{14*}\rightarrow {}_{6}C^{13}+{}_{1}H^{1}$$
$$_{11}Na^{23}+{}_{2}He^{4}\rightarrow {}_{13}Al^{27*}\quad {}_{12}Mg^{26}+{}_{1}H^{1}$$
$$_{12}Mg^{26}+{}_{2}He^{4}\rightarrow {}_{14}Si^{30*}-\quad {}_{13}Al^{29}+{}_{1}H^{1}$$

বেরিলিয়াম, বোরন প্রভৃতি মৌলের ক্ষেত্রে α-কণিকা বর্ষণের (Bombardment) ফলে প্রোটনের পরিবর্তে অনেক সময় নিউট্রন নিঃসৃত হয়। এই জাতীয় বিক্রিয়াকে (α, $n$) বিক্রিয়া আখ্যা দেওয়া যায় এবং সাধারণ ভাবে এইরূপ বিক্রিয়াকে নিম্নলিখিত সমীকরণ দ্বারা নির্দেশিত করা যায়ঃ

$$_{Z}X^{A}+{}_{2}He^{4}\quad {}_{Z+2}C^{A+4*}\quad {}_{Z+2}Y^{A+3}+{}_{0}n^{1}$$

(α, $n$) বিক্রিয়াও সাধারণতঃ শক্তি-গ্রাহী (Endoergic) হয়; অর্থাৎ এইরূপ বিক্রিয়ার ক্ষেত্রে $Q<0$ হয়। কয়েকটি (α, $n$) বিক্রিয়ার নিদর্শন হচ্ছেঃ

$$_{3}Li^{7}+{}_{2}He^{4}\quad {}_{5}B^{11*}\rightarrow {}_{5}B^{10}+{}_{0}n^{1}$$
$$O\ +{}_{2}He^{4}\quad Ne^{20*}\quad {}_{10}Ne^{19}+{}_{0}n^{1}$$
$$_{13}Al^{27}+{}_{2}He^{4}\quad {}_{15}P^{31*}\quad {}_{15}P^{30}+{}_{0}n^{1}$$

উপরে প্রদত্ত উদাহরণগুলির মধ্যে সর্বশেষ বিক্রিয়ার সাহায্যে কৃত্রিম তেজস্ক্রিয়তা (Artificial Radioactivity) আবিষ্কৃত হয় (17·10 অনুচ্ছেদ দ্রষ্টব্য)।

বেরিলিয়ামের উপরে $(\alpha, n)$ জাতীয় কেন্দ্রক বিক্রিয়া অনুষ্ঠিত করে নিউট্রন উৎস প্রস্তুত করা সম্বন্ধে (17·14) অনুচ্ছেদে বিস্তারিত আলোচনা করা হবে।

প্রাকৃতিক তেজস্ক্রিয় পদার্থ ছাড়াও হিলিয়াম গ্যাসকে আয়নিত করে এবং বিভিন্ন প্রকার কণিকা ত্বরণযন্ত্রের সাহায্যে তাদের ইচ্ছামত উচ্চশক্তি সম্পন্ন করে $\alpha$-কণিকাগুচ্ছ উৎপন্ন করা সম্ভব। এই ভাবে কৃত্রিম উপায়ে প্রাপ্ত $\alpha$-কণিকার সাহায্যেও নানাবিধ কেন্দ্রক বিক্রিয়া সংঘটিত করা হয়েছে।

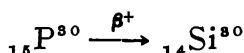
## 17·10 : কৃত্রিম তেজস্ক্রিয়তার আবিষ্কার

১৯৩৩ সালে ফ্রান্সে আইরীন কুরী-জোলিও এবং তাঁর স্বামী অধ্যাপক জোলিও সর্বপ্রথম কৃত্রিম পদ্ধতিতে তেজস্ক্রিয় পদার্থ উৎপন্ন করেন। তাঁরা একটি অ্যালুমিনিয়ামের পাতের উপর $\alpha$-কণিকা বর্ষণ করে নিউট্রন নিঃসৃত হতে দেখেন। জোলিও দম্পতি তাঁদের পরীক্ষা কালে অ্যালুমিনিয়ামের পাত থেকে নিউট্রন ছাড়া পজিট্রনও নির্গত হতে দেখেন। তাঁরা আরও লক্ষ্য করেন যে অ্যালুমিনিয়াম পাতের উপরে $\alpha$-কণিকা বর্ষণ বন্ধ করার পরেও কয়েক মিনিট ধরে পজিট্রন নিঃসৃত হতে থাকে। নিঃসৃত পজিট্রনের সংখ্যা সময়ের সংগে সূচক-সূত্র (Exponential Law) অনুযায়ী হ্রাস পেতে থাকে।

এই ঘটনা ব্যাখ্যা করতে গিয়ে জোলিও দম্পতি অনুমান করেন যে $(\alpha, n)$ জাতীয় বিক্রিয়ার ফলে অ্যালুমিনিয়াম $(Z=13)$ থেকে নিম্নলিখিত সমীকরণ অনুযায়ী ফসফরাসের $(Z=15)$ আইসোটোপ $P^{30}$ উৎপন্ন হয়

$$Al^{27}(\alpha,n)\,P^{30}$$

তাঁরা আরও অনুমান করেন যে, উৎপন্ন অবশিষ্ট কেন্দ্রক $P^{30}$ একটি তেজস্ক্রিয় কেন্দ্রক। পজিট্রন নিঃসৃত করে এটি নিম্নলিখিত সমীকরণ অনুযায়ী বিঘটিত হয়ঃ

$$_{15}P^{30} \xrightarrow{\beta^+} {_{14}Si^{30}}$$

তাঁদের এই অনুমানের সত্যতা প্রমাণের জন্য তাঁরা দীর্ঘ সময় ধরে $\alpha$-কণিকা বর্ষণ করার পর অ্যালুমিনিয়াম থেকে রাসায়নিক পদ্ধতিতে ফসফরাস

পৃথক করে দেখেন যে পৃথকীকৃত ফসফরাস থেকে পজিট্রন নিঃসৃত হতে থাকে। পৃথকীকরণের পরে অ্যালুমিনিয়াম থেকে পজিট্রন নিঃসরণের আর কোন নিদর্শন পাওয়া যায় না। এই ভাবে তাঁরা সর্বপ্রথম 'কৃত্রিম তেজস্ক্রিয়তা' (Artificial Radioactivity) আবিষ্কার করেন। উৎপন্ন তেজস্ক্রিয় $P^{30}$ আইসোটোপের অর্ধজীবনকাল পরিমাপ করে 2·55 মিনিট পাওয়া যায়।

অ্যালুমিনিয়াম ছাড়া জোলিও দম্পতি বোরন ($Z=5$) এবং ম্যাগনেসিয়াম ($Z=12$) মৌল দুটির উপরেও $\alpha$-কণিকা বর্ষণ করে নাইট্রোজেন এবং সিলিকনের তেজস্ক্রিয় আইসোটোপ উৎপন্ন করেন।

তাঁদের এই অত্যন্ত গুরুত্বপূর্ণ আবিষ্কারের জন্য ১৯৩৫ সালে তাঁরা যুক্তভাবে নোবেল পুরস্কার প্রাপ্ত হন।

পরবর্তী কালে কেন্দ্রক বিক্রিয়ার দ্বারা বিভিন্ন মৌলের নানারূপ আইসোটোপ কৃত্রিম উপায়ে উৎপন্ন করা হয়েছে। এদের মধ্যে বেশীর ভাগ আইসোটোপই অস্থায়ী, অর্থাৎ তেজস্ক্রিয়। এইসব কৃত্রিম উপায়ে উৎপন্ন তেজস্ক্রিয় পদার্থসমূহ পজিট্রন ( $\beta^+$ ) ছাড়াও ইলেকট্রন ( $\beta^-$ ) নিঃসৃত করে বা ইলেকট্রন আহরণ (Electron Capture) করে বিঘটিত হয়। তা ছাড়া ভারী মৌলসমূহের ক্ষেত্রে অনেক সময় $\alpha$-বিঘটনশীল তেজস্ক্রিয় পদার্থও কৃত্রিম উপায়ে উৎপন্ন করা যায়। বর্তমান কালে কেন্দ্রকীয় পদার্থবিদ্যা ছাড়াও রসায়ন, কৃষি বিজ্ঞান (Agricultural Science), শারীর বৃত্ত (Physiology), চিকিৎসা-শাস্ত্র (Medical Science) প্রভৃতি নানা ক্ষেত্রে কৃত্রিম তেজস্ক্রিয় পদার্থ বহুল পরিমাণে ব্যবহৃত হয় ( 17·22 অনুচ্ছেদ দ্রষ্টব্য )।

এখানে উল্লেখযোগ্য যে পূর্ববর্তী অনুচ্ছেদে প্রদত্ত বিভিন্ন প্রকার কেন্দ্রক বিক্রিয়ার উদাহরণের মধ্যে কয়েকটি ক্ষেত্রে উৎপন্ন অবশিষ্ট কেন্দ্রকগুলি তেজস্ক্রিয় হয়। এর মধ্যে $Al^{27}(\alpha, n)\, P^{30}$ বিক্রিয়ার ক্ষেত্রে উৎপন্ন $P^{30}$ কেন্দ্রকের $\beta^+$ তেজস্ক্রিয়তা সম্বন্ধে উপরে আলোচনা করা হয়েছে। তাছাড়া $Mg^{26}(\alpha, p)\, Al^{29}$ এবং $O^{16}(\alpha, n)\, Ne^{19}$ কেন্দ্রকগুলি তেজস্ক্রিয় হয়। এদের তেজস্ক্রিয় বিঘটন নিম্নলিখিত সমীকরণগুলি দ্বারা নির্দেশিত করা যায়ঃ

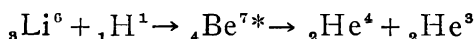
$${}_{10}Ne^{19} \xrightarrow{\beta^+} {}_{9}F^{19} \qquad (\tau = 18{\cdot}5 \text{ সেকেণ্ড})$$

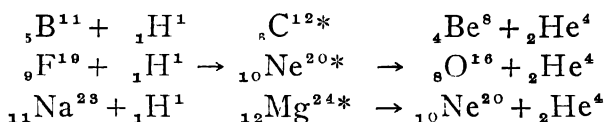
$${}_{13}Al^{29} \xrightarrow{\beta^-} {}_{14}Si^{29} \qquad (\tau = 6{\cdot}6 \text{ মিনিট})$$

## 17·11 : প্রোটন দ্বারা কেন্দ্রক বিঘটন

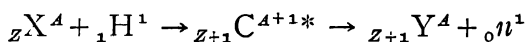
উচ্চশক্তি প্রোটন কোন কেন্দ্রকের উপরে আপতিত করলে সৃষ্ট যৌগ-কেন্দ্রকটি (Compound Nucleus) প্রোটন, নিউট্রন, ডয়টেরন, α-কণিকা প্রভৃতি নানা জাতীয় কেন্দ্রকীয় কণিকা নিঃসৃত করে বিঘটিত হতে পারে।

এদের মধ্যে $Li^7\,(p, \alpha)He^4$ কেন্দ্রক-বিক্রিয়া সম্বন্ধে (17·8) অনুচ্ছেদে আলোচনা করা হয়েছে। (17·7$a$) সমীকরণ থেকে দেখান যায় যে সাধারণতঃ $(p, \alpha)$ জাতীয় কেন্দ্রক বিক্রিয়া শক্তি-দায়ী (Exoergic) হয়। অর্থাৎ এদের $Q>0$ হয়। প্রাকৃতিক লিথিয়ামের মধ্যে $Li^7$ ছাড়া আর একটি স্থায়ী আইসোটোপ $Li^6$ থাকে। প্রোটন বর্ষণের ফলে $Li^6$ কেন্দ্রক নিম্নলিখিত ভাবে বিঘটিত হয় ঃ

$${}_3Li^6 + {}_1H^1 \rightarrow {}_4Be^{7*} \rightarrow {}_2He^4 + {}_2He^3$$

অর্থাৎ এই কেন্দ্রক বিক্রিয়ায় একটি $He^4$ কেন্দ্রক ( α-কণিকা ) এবং একটি $He^3$ কেন্দ্রক সৃষ্ট হয়। এক্ষেত্রে $He^4$ এবং $He^3$ কেন্দ্রক দুটির পথসীমা (Range) পরিমাপ করে $Q$ পাওয়া যায় 3·94 মি-ই-ভো। আর কয়েকটি $(p, \alpha)$ বিক্রিয়ার দৃষ্টান্ত হচ্ছে

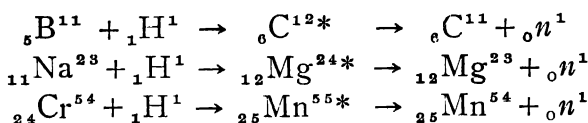
$$\begin{array}{lllll} {}_5B^{11} + {}_1H^1 & & {}_6C^{12*} & & {}_4Be^8 + {}_2He^4 \\ {}_9F^{19} + {}_1H^1 & \rightarrow & {}_{10}Ne^{20*} & \rightarrow & {}_8O^{16} + {}_2He^4 \\ {}_{11}Na^{23} + {}_1H^1 & & {}_{12}Mg^{24*} & \rightarrow & {}_{10}Ne^{20} + {}_2He^4 \end{array}$$

এদের মধ্যে প্রথম বিক্রিয়ার ক্ষেত্রে উৎপন্ন অবশিষ্ট কেন্দ্রক $Be^8$ অত্যন্ত অস্থায়ী (Unstable) হয়। উৎপন্ন হবার সংগে সংগেই $Be^8$ দুটি α-কণিকায় বিঘটিত হয়ে যায় ($Be^8 \rightarrow He^4 + He^4$) ; অর্থাৎ এই বিক্রিয়ায় মোট তিনটি α-কণিকার সৃষ্টি হয়।

কোন কেন্দ্রকের উপরে প্রোটন বর্ষণের ফলে যদি নিউট্রন নিঃসৃত হয় তবে উক্ত কেন্দ্রক বিক্রিয়াকে $(p, n)$ বিক্রিয়া আখ্যা দেওয়া যায়। এই বিক্রিয়াকে নিম্নলিখিত সমীকরণ দ্বারা নির্দেশিত করা যায় ঃ

$${}_ZX^A + {}_1H^1 \rightarrow {}_{Z+1}C^{A+1*} \rightarrow {}_{Z+1}Y^A + {}_0n^1$$

এক্ষেত্রে উৎপন্ন অবশিষ্ট কেন্দ্রকটির ভর-সংখ্যা আদি কেন্দ্রকের ভর-সংখ্যার সমান হয়, কিন্তু পরমাণবিক সংখ্যা এক একক পরিমাণ বেশী হয়। অর্থাৎ অবশিষ্ট কেন্দ্রকটি আদি কেন্দ্রকের একটি আইসোবার (Isobar)

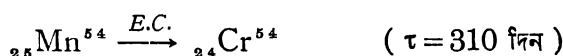
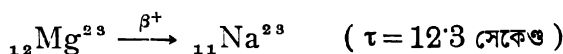
হয়। আমরা ইতিপূর্বে দেখেছি ( 16.12 অনুচ্ছেদ দ্রষ্টব্য ) যে, দুটি আইসোবারের পরমাণবিক সংখ্যার মধ্যে যদি এক একক পরিমাণ পার্থক্য থাকে, তাহলে এদের মধ্যে অন্ততঃ একটি অস্থায়ী (Unstable) হবে। যেহেতু আদি কেন্দ্রক ($X^A$) স্থায়ী, অতএব অবশিষ্ট কেন্দ্রক $Y^A$ এক্ষেত্রে অস্থায়ী হবে। এটি হয় $\beta^+$ বিঘটনশীল হবে আর না হয় K-ইলেকট্রন আহরণ (K-Capture) করে বিঘটিত হবে।

($p, n$) বিক্রিয়ার কয়েকটি উদাহরণ হচ্ছে ঃ

$$_5B^{11} + {}_1H^1 \rightarrow {}_6C^{12*} \rightarrow {}_6C^{11} + {}_0n^1$$
$$_{11}Na^{23} + {}_1H^1 \rightarrow {}_{12}Mg^{24*} \rightarrow {}_{12}Mg^{23} + {}_0n^1$$
$$_{24}Cr^{54} + {}_1H^1 \rightarrow {}_{25}Mn^{55*} \rightarrow {}_{25}Mn^{54} + {}_0n^1$$

উপরে প্রদত্ত দৃষ্টান্তসমূহের প্রত্যেক ক্ষেত্রে উৎপন্ন কেন্দ্রকগুলি ($C^{11}$, $Mg^{23}$, $Mn^{54}$) তেজস্ক্রিয় হয়। যথা

$$_6C^{11} \xrightarrow{\beta^+} {}_5B^{1} \qquad (\tau = 20.5 \text{ মিনিট})$$

$$_{12}Mg^{23} \xrightarrow{\beta^+} {}_{11}Na^{23} \qquad (\tau = 12.3 \text{ সেকেণ্ড})$$

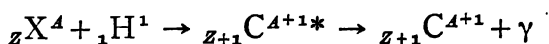
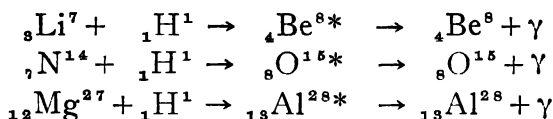
$$_{25}Mn^{54} \xrightarrow{E.C.} {}_{24}Cr^{54} \qquad (\tau = 310 \text{ দিন})$$

শেষোক্ত উদাহরণে $E.C.$ চিহ্ন দ্বারা কক্ষীয় ইলেকট্রন আহরণ (Orbital Electron Capture) নির্দেশিত করা হয়েছে।

($p, n$) জাতীয় বিক্রিয়া সব সময় শক্তি-গ্রাহী (Endoergic) হয়; অর্থাৎ $Q < 0$ হয়। বিক্রিয়া উৎপন্নকারী প্রোটনের সূচনা শক্তি (Threshold Energy) পরিমাপ করে এইরূপ বিক্রিয়ার $Q$-সংখ্যা নির্ণয় করা সম্ভব।

কোন কোন ক্ষেত্রে প্রোটন বর্ষণের ফলে যে উত্তেজিত যৌগ-কেন্দ্রক উৎপন্ন হয় তার থেকে কোন কণিকা নিঃসৃত না হয়ে শুধু $\gamma$-রশ্মি নিঃসৃত হয়। এই জাতীয় বিক্রিয়াকে প্রোটন-আহরণ বিক্রিয়া (Proton Capture Reaction) বা ($p, \gamma$) বিক্রিয়া বলা যায়। নিম্নলিখিত সমীকরণ দ্বারা এইরূপ বিক্রিয়া নির্দেশিত করা যায় ঃ

$$_ZX^A + {}_1H^1 \rightarrow {}_{Z+1}C^{A+1*} \rightarrow {}_{Z+1}C^{A+1} + \gamma$$

$(p, \gamma)$ বিক্রিয়ার কয়েকটি উদাহরণ হচ্ছে

$$_3Li^7 + {}_1H^1 \rightarrow {}_4Be^{8*} \rightarrow {}_4Be^8 + \gamma$$
$$_7N^{14} + {}_1H^1 \rightarrow {}_8O^{15*} \rightarrow {}_8O^{15} + \gamma$$
$$_{12}Mg^{27} + {}_1H^1 \rightarrow {}_{13}Al^{28*} \rightarrow {}_{13}Al^{28} + \gamma$$

$(p, \gamma)$ বিক্রিয়ার ক্ষেত্রে অনেক সময় নিঃসৃত $\gamma$-রশ্মির শক্তি খুব উচ্চ হয়। উপরে প্রদত্ত প্রথম বিক্রিয়ার ক্ষেত্রে নিঃসৃত $\gamma$-রশ্মির শক্তি 17·2 মি-ই-ভো হয়। এই শক্তি প্রাকৃতিক তেজস্ক্রিয় পদার্থ থেকে প্রাপ্ত সর্বোচ্চ শক্তি সম্পন্ন $ThC''$ $\gamma$-রশ্মির শক্তি 2·62 মি-ই-ভো অপেক্ষা বহুগুণ বেশী।

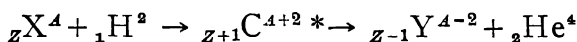
## 17·12 : ডয়টেরন দ্বারা সংঘটিত কেন্দ্রক বিক্রিয়া

প্রাকৃতিক হাইড্রোজেনে প্রধান আইসোটোপ $H^1$ ছাড়াও দুই একক ভর-সংখ্যা সম্পন্ন $H^2$ ( বা $D^2$ ) আইসোটোপের অস্তিত্ব সম্বন্ধে (3·9) অনুচ্ছেদে আলোচনা করা হয়েছে। এই ভারী হাইড্রোজেন বা ডয়টেরিয়ামকে জলের তড়িৎ-বিশ্লেষণ (Electrolysis) করে প্রাকৃতিক হাইড্রোজেন থেকে পৃথকীকৃত করা সম্ভব। প্রাকৃতিক জলের মধ্যে সাধারণ জল $(H_2O)$ এবং ভারী জল $(D_2O)$, দুই প্রকার জলই বর্তমান থাকে। শেষোক্ত প্রকার জলের অনুপাত অবশ্য খুব কম হয়। সাধারণ জল হালকা হওয়ার জন্য তড়িৎ-বিশ্লেষণের সময়ে অপেক্ষাকৃত দ্রুত বিশ্লেষিত হয়। ফলে দীর্ঘ সময় ধরে তড়িৎ বিশ্লেষণের পরে অবশিষ্ট জলের মধ্যে ভারী জলের অনুপাত বৃদ্ধি পায়। বারবার তড়িৎ বিশ্লেষণ করে অবশেষে প্রায় বিশুদ্ধ ভারী জল পাওয়া যায়। এই পদ্ধতিতে ভারী জল পৃথকীকরণের জন্য প্রচুর পরিমাণ বৈদ্যুতিক ক্ষমতার (Power) প্রয়োজন হয়। এক গ্রাম ভারী জল পেতে হলে প্রায় 30,000 অ্যামপিয়ার-ঘণ্টা (Ampere-hour) বৈদ্যুতিক শক্তি প্রয়োজন হয়। আমাদের দেশে বর্তমানে নাংগাল, রাণাপ্রতাপ-সাগর, বরোদা এবং টুটিকরিনে ভারী জল উৎপাদন কেন্দ্র স্থাপিত করা হয়েছে। ভারী জলের ধর্মাবলী সাধারণ জল থেকে যথেষ্ট পৃথক হয়। এর আপেক্ষিক ঘনত্ব 1·108 পাওয়া যায়।

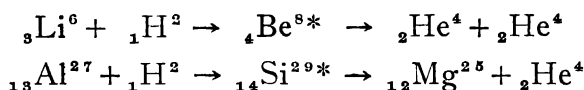
বিশুদ্ধ ভারী জল থেকে তড়িৎ বিশ্লেষণ করে ডয়টেরিয়াম অর্থাৎ ভারী হাইড্রোজেন পরমাণু পাওয়া যায়। এই পরমাণু আয়নিত করলে ডয়টেরন, অর্থাৎ ভারী হাইড্রোজেন কেন্দ্রক পাওয়া যায়, যার মধ্যে একটি প্রোটন ও একটি নিউট্রন দৃঢ় সংবদ্ধ থাকে। বিভিন্ন কণিকা ত্বরণযন্ত্রের (Accelerators) সাহায্যে প্রোটনের মত ডয়টেরনগুলিকেও উচ্চশক্তি সম্পন্ন করে তোলা যায়

এবং এদের সাহায্যে কেন্দ্রক বিঘটন অনুষ্ঠিত করা সম্ভব হয়। বিঘটনের ফলে $\alpha$-কণিকা, প্রোটন, নিউট্রন ইত্যাদি কণিকা নিঃসৃত হয়।

$(d, \alpha)$ জাতীয় বিক্রিয়া নিম্নলিখিত সমীকরণ দ্বারা নির্দেশিত করা যায় ঃ

$$_{Z}X^{A} + {}_{1}H^{2} \rightarrow {}_{Z+1}C^{A+2}\,{}^{*} \rightarrow {}_{Z-1}Y^{A-2} + {}_{2}He^{4}$$

যেহেতু $\alpha$-কণিকা অপেক্ষা ডয়টেরন অনেক শিথিলতর ভাবে সংবদ্ধ থাকে, অতএব $(17{\cdot}7a)$ সমীকরণের সাহায্যে দেখান যায় যে $(d, \alpha)$ বিক্রিয়া সাধারণতঃ শক্তি-দায়ী (Exoergic) হয়; অর্থাৎ এক্ষেত্রে $Q > 0$ হয়। কয়েকটি $(d, \alpha)$ জাতীয় বিক্রিয়ার নিদর্শন হচ্ছে ঃ

$$_{3}Li^{6} + {}_{1}H^{2} \rightarrow {}_{4}Be^{8*} \rightarrow {}_{2}He^{4} + {}_{2}He^{4}$$

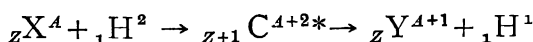
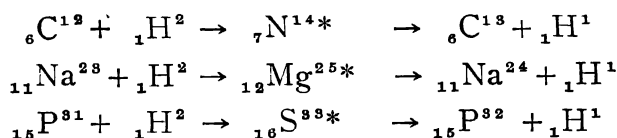
$$_{13}Al^{27} + {}_{1}H^{2} \rightarrow {}_{14}Si^{29*} \rightarrow {}_{12}Mg^{25} + {}_{2}He^{4}$$

ডয়টেরন বর্ষণের ফলে প্রোটন নিঃসৃত হলে $(d, p)$ জাতীয় বিক্রিয়া পাওয়া যায়। এইরূপ বিক্রিয়া সাধারণতঃ শক্তি-দায়ী (Exoergic) হয়; অর্থাৎ $Q > 0$ হয়। এই জাতীয় বিক্রিয়া নিম্নলিখিত সমীকরণ দ্বারা নির্দেশিত করা যায় ঃ

$$_{Z}X^{A} + {}_{1}H^{2} \rightarrow {}_{Z+1}C^{A+2*} \rightarrow {}_{Z}Y^{A+1} + {}_{1}H^{1}$$

$(d, p)$ বিক্রিয়ার উদাহরণ হচ্ছে

$$_{6}C^{12} + {}_{1}H^{2} \rightarrow {}_{7}N^{14*} \rightarrow {}_{6}C^{13} + {}_{1}H^{1}$$

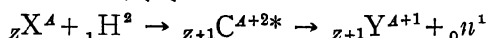
$$_{11}Na^{23} + {}_{1}H^{2} \rightarrow {}_{12}Mg^{25*} \rightarrow {}_{11}Na^{24} + {}_{1}H^{1}$$

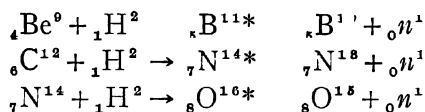
$$_{15}P^{31} + {}_{1}H^{2} \rightarrow {}_{16}S^{33*} \rightarrow {}_{15}P^{32} + {}_{1}H^{1}$$

$(d, p)$ বিক্রিয়ার ফলে উৎপন্ন অবশিষ্ট কেন্দ্রকটি আদি কেন্দ্রকের একটি আইসোটোপ হয়। এর ভরসংখ্যা আদি কেন্দ্রকের ভরসংখ্যা অপেক্ষা এক একক বেশী হয়। উৎপন্ন কেন্দ্রক স্থায়ী হতে পারে (প্রথম উদাহরণে $C^{13}$) অথবা তেজস্ক্রিয় হতে পারে। তেজস্ক্রিয় হলে সাধারণতঃ এরা $\beta^{-}$ বিঘটনশীল হয়। দ্বিতীয় এবং তৃতীয় উদাহরণে অবশিষ্ট কেন্দ্রক দুটির বিঘটন নিম্নলিখিত প্রক্রিয়ায় ঘটে ঃ

$$_{1}Na^{24} \xrightarrow{\beta} {}_{12}Mg^{2} \qquad (\tau = 15{\cdot}0 \text{ ঘণ্টা})$$

$$_{5}P^{32} \xrightarrow{\beta^{-}} {}_{16}S^{32} \qquad (\tau = 14{\cdot}6 \text{ দিন})$$

ডয়টেরন বর্ষণের ফলে অনেক সময় নিউট্রন উৎপন্ন হয়। $(d, n)$ জাতীয় বিক্রিয়ার সমীকরণ হচ্ছে

$$_{Z}X^{A} + {}_{1}H^{2} \rightarrow {}_{Z+1}C^{A+2*} \rightarrow {}_{Z+1}Y^{A+1} + {}_{0}n^{1}$$

এক্ষেত্রে উৎপন্ন অবশিষ্ট কেন্দ্রকটি যৌগ-কেন্দ্রকের একটি আইসোটোপ হয়। $(d, n)$ বিক্রিয়ার নিদর্শন হচ্ছে

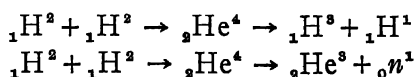
$$_{4}Be^{9} + {}_{1}H^{2} \quad {}_{5}B^{11*} \quad {}_{5}B^{1\,'} + {}_{0}n^{1}$$
$$_{6}C^{12} + {}_{1}H^{2} \rightarrow {}_{7}N^{14*} \quad {}_{7}N^{18} + {}_{0}n^{1}$$
$$_{7}N^{14} + {}_{1}H^{2} \rightarrow {}_{8}O^{16*} \quad {}_{8}O^{15} + {}_{0}n^{1}$$

উৎপন্ন অবশিষ্ট কেন্দ্রক স্থায়ী ( প্রথম উদাহরণে $B^{10}$) অথবা $\beta^{+}$ বিঘটনশীল হতে পারে। দ্বিতীয় এবং তৃতীয় উদাহরণে উৎপন্ন তেজস্ক্রিয় কেন্দ্রকদ্বয়ের বিঘটন নিম্নলিখিত প্রক্রিয়ায় ঘটে ঃ

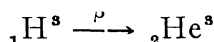
$$_{7}N^{1} \xrightarrow{\beta^{+}} {}_{6}C^{18} \qquad (\tau = 10{\cdot}2 \text{ মিনিট})$$

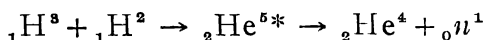
$$_{8}O^{15} \xrightarrow{\beta^{+}} {}_{7}N^{1} \qquad (\tau = 126 \text{ সেকেণ্ড})$$

এখানে উল্লেখযোগ্য যে $(d, p)$ এবং $(d, n)$ জাতীয় বিক্রিয়াদ্বয় যৌগ-কেন্দ্রক সৃষ্টি না করে অন্য এক বিকল্প পদ্ধতিতে সংঘটিত হতে পারে। যেহেতু ডয়টেরনের মধ্যে প্রোটন ও নিউট্রন দুটি শিথিলভাবে সংবদ্ধ থাকে এবং তাদের মধ্যেকার ব্যবধান অপেক্ষাকৃত বেশী হয় ( প্রায় $4{\cdot}3 \times 10^{-13}$ সেমি ), অতএব লক্ষ্য কেন্দ্রকের দিকে আগত ডয়টেরনের মধ্যেকার একটি কণিকা ( প্রোটন বা নিউট্রন ) কেন্দ্রকের পৃষ্ঠতলের খুব কাছাকাছি আসার জন্য অন্য কণিকাটি থেকে বিচ্ছিন্ন হয়ে কেন্দ্রকের মধ্যে ধরা পড়ে। এর নাম 'বিচ্ছেদক বিক্রিয়া' (Stripping Reaction)। নিম্নশক্তি ডয়টেরনের ক্ষেত্রে সাধারণতঃ নিউট্রনটিই বেশীর ভাগ সময় কেন্দ্রকের মধ্যে ধরা পড়ে, কারণ কেন্দ্রকের কুলম্ব বিকর্ষণী বলের প্রভাবে প্রোটনটি দূরে সরে থাকে। সুতরাং নিম্নশক্তি ডয়টেরনের ক্ষেত্রে $(d, p)$ বিক্রিয়ার সম্ভাব্যতা বেশী হয়। এক্ষেত্রে এই বিক্রিয়া পদ্ধতিকে 'ওপেন্‌হাইমার-ফিলিপ্‌স্ পদ্ধতি' বলা হয়।

ডয়টেরন সম্বলিত যৌগ, যথা ভারী বরফের (Heavy Ice) উপরে ডয়রেটন বর্ষণ করলে ডয়টেরন-ডয়টেরন $(d-d)$ বিক্রিয়া ঘটে ঃ

$$_{1}H^{2} + {}_{1}H^{2} \rightarrow {}_{2}He^{4} \rightarrow {}_{1}H^{3} + {}_{1}H^{1}$$
$$_{1}H^{2} + {}_{1}H^{2} \rightarrow {}_{2}He^{4} \rightarrow {}_{2}He^{3} + {}_{0}n^{1}$$

এই দুই প্রকার বিক্রিয়া শক্তি-দায়ী (Exoergic) হয়। প্রথম ক্ষেত্রে $Q = 4{\cdot}03$ মি-ই-ভো এবং দ্বিতীয় ক্ষেত্রে $Q = 3{\cdot}26$ মি-ই-ভো পাওয়া যায়। প্রথম ক্ষেত্রে উৎপন্ন কেন্দ্রক হচ্ছে হাইড্রোজেনের তিন একক ভর-সংখ্যা সম্পন্ন আইসোটোপ ট্রিটিয়াম (Tritium)। এটি $\beta^-$ বিঘটনশীল এবং এর অর্ধজীবনকাল $12{\cdot}4$ বৎসর হয়। এটি $0{\cdot}019$ মি-ই-ভো শক্তি সম্পন্ন $\beta^-$ কণিকা নিঃসৃত করে $He^3$ আইসোটোপে রূপান্তরিত হয়ঃ

$$_1H^3 \xrightarrow{\beta} {}_2He^3$$

হাইড্রোজেনের $H^3$ আইসোটোপের সংগে ডয়টেরনের বিক্রিয়া, অর্থাৎ $(d-t)$ বিক্রিয়া কালেও প্রচুর পরিমাণে শক্তি নিঃসৃত হয়ঃ

$$_1H^3 + {}_1H^2 \rightarrow {}_2He^{5*} \rightarrow {}_2He^4 + {}_0n^1$$

উপরে আলোচিত তিনটি বিক্রিয়াই হচ্ছে 'কেন্দ্রক সংযোজন' (Nuclear Fusion) পদ্ধতির নিদর্শন। নিউট্রন উৎপাদনের ক্ষেত্রে এবং তাপীয় কেন্দ্রক বিক্রিয়া (Thermo Nuclear Reaction) পদ্ধতিতে শক্তি নিঃসারণের ক্ষেত্রে উপরোক্ত বিক্রিয়াগুলির ভূমিকা বিশেষ গুরুত্বপূর্ণ (19·13 অনুচ্ছেদ দ্রষ্টব্য)।

$(d, d)$ এবং $(d-t)$ উভয় প্রকার বিক্রিয়ার সাহায্যে উৎপন্ন নিউট্রন নানারূপ কেন্দ্রক বিক্রিয়া পরীক্ষার কাজে ব্যবহৃত হয়।

## 17·13 : আহিত কণিকার দ্বারা কেন্দ্রক বিক্রিয়া অনুষ্ঠানের সম্ভাব্যতা

প্রোটন, ডয়টেরন বা $\alpha$-কণিকার দ্বারা কেন্দ্রক বিক্রিয়া সংঘটিত করার পথে সর্বাপেক্ষা গুরুতর প্রতিবন্ধক হচ্ছে যে এইসব ধনাত্মক আহিত কণিকাগুলি কেন্দ্রকের দ্বারা বিকৃষ্ট হয়। ফলে যথেষ্ট উচ্চশক্তি সম্পন্ন না হলে এরা কেন্দ্রকের অভ্যন্তরে প্রবেশ করে কেন্দ্রক বিঘটিত করতে পারে না। শক্তি-দায়ী (Exoergic) বিক্রিয়ার ক্ষেত্রে শূন্য গতিশক্তি সম্পন্ন প্রক্ষিপ্ত কণিকা (Projectile) ব্যবহার করেও কেন্দ্রক বিক্রিয়া সংঘটিত করা তাত্ত্বিক দিক থেকে সম্ভব। কিন্তু প্রকৃতপক্ষে ধনাত্মক আধানবাহী প্রক্ষিপ্ত কণিকার দ্বারা এইরূপ বিক্রিয়া অনুষ্ঠিত করতে হলে কেন্দ্রকের বিকর্ষণ কাটাবার জন্য আপতিত কণিকাটিকে যথেষ্ট শক্তিশালী করা প্রয়োজন। সনাতন বলবিদ্যার (Classical Mechanics) সূত্র অনুযায়ী কোন আহিত কণিকাকে কেন্দ্রকের

ভিতরে অনুপ্রবেশ করতে হলে প্রয়োজনীয় ন্যূনতম শক্তির মান কেন্দ্রক আবেষ্টনকারী বিভব-প্রতিবন্ধকের (Potential Barrier) উচ্চতার সমান হতে হবে ( 12·15 অনুচ্ছেদ দ্রষ্টব্য )। $R$ ব্যাসার্ধ সম্পন্ন এবং $Ze$ আধানবাহী কেন্দ্রকের দিকে যদি কোন $e$ আধান সম্পন্ন বিন্দুসদৃশ কণিকাকে প্রক্ষিপ্ত করা যায়, তাহলে বিভব প্রতিবন্ধকের উচ্চতা হবে

$$V_R = Ze^2/R$$

উদাহরণস্বরূপ কক্রফ্‌ট-ওয়াল্‌টনের প্রোটন দ্বারা $Li^7$ কেন্দ্রক বিঘটন সম্পর্কিত পরীক্ষায় $Z=3$ এবং $R=2{\cdot}7\times10^{-13}$ সেমি; সুতরাং $V_R=1{\cdot}6$ মি-ই-ভো হয়। অর্থাৎ সনাতন বলবিদ্যা অনুযায়ী আপতিত প্রোটনের ন্যূনতম শক্তি 1·6 মি-ই-ভো হলে তবেই তারা $Li^7$ কেন্দ্রকের মধ্যে প্রবেশ করে বিক্রিয়া অনুষ্ঠিত করতে পারবে। প্রকৃতপক্ষে কিন্তু (17·8) অনুচ্ছেদে দেখা গেছে যে কক্রফ্‌ট এবং ওয়াল্‌টন 0·5 মি-ই-ভো অথবা আরও কম শক্তি সম্পন্ন প্রোটন ব্যবহার করে এই বিক্রিয়া সংঘটিত করাতে সমর্থ হন। এর কারণ হচ্ছে যে আধুনিক কোয়ানটাম বলবিদ্যা অনুযায়ী বিভব-প্রতিবন্ধকের উচ্চতা অপেক্ষা নিম্নতর শক্তি সম্পন্ন প্রোটনের পক্ষে উক্ত প্রতিবন্ধক ভেদ করে কেন্দ্রকের মধ্যে প্রবেশ করার একটা সীমিত সম্ভাব্যতা (Probability) আছে। এই সংঘটনকে 'সুড়ংগ-প্রক্রিয়া' (Tunnel Effect) আখ্যা দেওয়া হয়। তেজস্ক্রিয় কেন্দ্রক থেকে α-কণিকা নিঃসরণ ব্যাখ্যা করার সময়ে (12·15) অনুচ্ছেদে এই সুড়ংগ প্রক্রিয়া সম্বন্ধে আলোচনা করা হয়েছে। সেখানে দেখা গেছে যে α-কণিকার শক্তি বিভব-প্রতিবন্ধকের উচ্চতা অপেক্ষা অনেক কম হওয়া সত্ত্বেও তারা উক্ত প্রতিবন্ধক ভেদ করে কেন্দ্রক থেকে নিঃসৃত হতে পারে। আহিত কণিকার পক্ষে এই ভাবে বিভব-প্রতিবন্ধক ভেদ করে যাবার সম্ভাব্যতা নির্ভর করে কণিকাটির শক্তির উপরে। শক্তি যত উচ্চ হয় এই সম্ভাব্যতা তত দ্রুত বৃদ্ধি পেতে থাকে। সুতরাং আপতিত প্রোটনের শক্তি বেশী হলে কেন্দ্রক বিঘটন প্রক্রিয়ার সংখ্যাও বেশী হয়।

প্রোটনের পরিবর্তে ডয়টেরন বা α-কণিকাকে যদি প্রক্ষিপ্ত কণিকা হিসাবে ব্যবহার করা হয়, তাহলেও উপরে প্রদত্ত আলোচনা অনুযায়ী বিভব-প্রতিবন্ধকের উচ্চতা অপেক্ষা কম শক্তি সম্পন্ন এই সব কণিকার দ্বারা কেন্দ্রক বিক্রিয়া অনুষ্ঠিত করা যায়। প্রোটনের মতই মাত্র কয়েক শত কিলো ইলেকট্রন-ভোল্ট শক্তি সম্পন্ন ডয়টেরন ব্যবহার করে হালকা, অর্থাৎ নিম্ন $Z$

সম্পন্ন পরমাণু বিঘটিত করা যায়। $\alpha$-কণিকার ক্ষেত্রে কিন্তু ন্যূনতম শক্তি কয়েক মিলিয়ন ($10^6$) ই-ভো না হলে হালকা কেন্দ্রকের ক্ষেত্রেও বিঘটনের সম্ভাব্যতা খুবই কম হয়। কারণ $\alpha$-কণিকার আধান প্রোটন বা ডয়টেরনের আধানের দ্বিগুণ। ফলে এক্ষেত্রে বিভব-প্রতিবন্ধকের উচ্চতা অনেক বেশী হয় এবং নিম্নতর শক্তি সম্পন্ন $\alpha$-কণিকাকে এই প্রতিবন্ধক প্রাচীরের অনেক বেশী বেধ সম্পন্ন অংশ ভেদ করে যেতে হয়, যার সম্ভাব্যতা খুবই কম হয় ( 12·15 অনুচ্ছেদ দ্রষ্টব্য )।

## 17.14 : নিউট্রন উৎস ; নিউট্রন দ্বারা সংঘটিত কেন্দ্রক বিক্রিয়া

নিউট্রন একটি আধানহীন কণিকা। স্পষ্টতঃ কেন্দ্রক বিঘটন অনুষ্ঠিত করার জন্য নিউট্রনকে প্রক্ষিপ্ত কণিকা (Projectile) হিসাবে ব্যবহার করা খুবই সুবিধাজনক। কারণ কেন্দ্রকের মধ্যে প্রবেশ করার সময় আহিত কণিকার মত নিউট্রন কোনরূপ বিকর্ষণী বল অনুভব করে না। ফলে প্রায় শূন্য শক্তি সম্পন্ন নিউট্রনও খুব সহজেই যে কোন কেন্দ্রকের অভ্যন্তরে প্রবেশ করতে পারে। এই সব নিউট্রন শক্তি-দায়ী (Exoergic) কেন্দ্রক বিক্রিয়া সংঘটিত করতে পারে। শক্তি-গ্রাহী (Endoergic) বিক্রিয়ার ক্ষেত্রে অবশ্য নিউট্রনগুলির একটা ন্যূনতম শক্তি থাকা প্রয়োজন, যার মান যচ্ছে সূচনা শক্তির সমান ( 17·4 অনুচ্ছেদ দ্রষ্টব্য )।

নিউট্রন দ্বারা কেন্দ্রক বিক্রিয়া সংঘটিত করার জন্য যথেষ্ট তীব্রতা সম্পন্ন নিউট্রন উৎসের প্রয়োজন। কেন্দ্রক বিক্রিয়ার দ্বারাই নিউট্রন উৎপন্ন করা সম্ভব। এদের মধ্যে বিশেষ কতকগুলি বিক্রিয়া ঘটার সম্ভাব্যতা খুব উচ্চ হয়। এই সব বিক্রিয়া সংঘটিত করে যথেষ্ট সংখ্যক নিউট্রন পাওয়া যেতে পারে।

সাধারণতঃ নিম্নে আলোচিত নিউট্রন উৎসগুলি পরীক্ষাগারে ব্যবহার করা হয়।

**(ক)** Ra-Be বা Pu-Be নিউট্রন উৎস ঃ

এই উৎসগুলিতে $(\alpha, n)$ জাতীয় কেন্দ্রক বিক্রিয়ার সাহায্যে নিউট্রন উৎপন্ন করা হয়। (17·6) অনুচ্ছেদে দেখা গেছে যে বেরিলিয়ামের সংগে $\alpha$-কণিকার বিক্রিয়া সম্বন্ধীয় পরীক্ষা থেকে নিউট্রন আবিষ্কৃত হয়। রেডিয়াম নিঃসৃত $\alpha$-কণিকার সাহায্যে এই বিক্রিয়া সংঘটিত করা যায়। রেডিয়ামের কোন লবণ ( যথা রেডিয়াম ক্লোরাইড ) এবং বেরিলিয়াম চূর্ণ মিশ্রিত করে

সাধারণতঃ নিউট্রন উৎস প্রস্তুত করা হয়। এক্ষেত্রে সংঘটিত কেন্দ্রক বিক্রিয়া $Be^9(\alpha, n)C^{12}$ সম্বন্ধে (17·7) অনুচ্ছেদে আলোচনা করা হয়েছে। যেহেতু রেডিয়ামের অর্ধজীবনকাল যথেষ্ট দীর্ঘ হয় (1620 বৎসর) সেইজন্য এইরূপ মিশ্রণের মধ্যে বর্তমান রেডিয়াম বহুকাল ধরে অপরিবর্তিত হারে $\alpha$-কণিকা নিঃসৃত করতে পারে, যার ফলে নির্দিষ্ট পরিমাণ রেডিয়াম মিশ্রিত উৎস থেকে দীর্ঘকাল ধরে অপরিবর্তিত হারে নিউট্রন পাওয়া যায়। এক গ্রাম রেডিয়ামের সংগে মিশ্রিত বেরিলিয়াম উৎস থেকে প্রতি সেকেণ্ডে প্রায় $10^6$ নিউট্রন পাওয়া যায়।

Ra-Be উৎস থেকে নিঃসৃত নিউট্রনগুলির শক্তি সমান হয় না,—শূন্য থেকে কয়েক মি-ই-ভো সীমার মধ্যে বণ্টিত হয়। এর কারণ হচ্ছে রেডিয়াম এবং এর সংগে দীর্ঘস্থায়ী স্থিতাবস্থায় বর্তমান বিভিন্ন মৌল থেকে নিঃসৃত $\alpha$-কণিকাগুলির শক্তি পৃথক হয়। তাছাড়া বেরিলিয়াম চূর্ণের মধ্য দিয়ে পরিভ্রমণ কালে এদের শক্তি ক্ষয় হয়। তার ফলে বিভিন্ন শক্তি সম্পন্ন $\alpha$-কণিকা দ্বারা $(\alpha, n)$ বিক্রিয়া অনুষ্ঠিত হয়। সেজন্য নিঃসৃত নিউট্রনের শক্তি বণ্টন দেখা যায়।

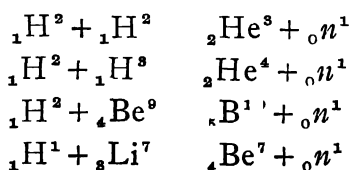
রেডিয়াম ছাড়া প্লুটোনিয়াম $(Z=94)$ নামক ইউরেনিয়ামোত্তর মৌলের দীর্ঘ অর্ধজীবনকাল সম্পন্ন $Pu^{239}$ ($\tau = 24{,}400$ বৎসর) আইসোটোপের সংগে বেরিলিয়াম মিশ্রিত করেও নিউট্রন উৎস প্রস্তুত করা যায়।

উপরে আলোচিত নিউট্রন উৎসগুলির জন্য কোন ত্বরণযন্ত্রের প্রয়োজন হয় না।

**(খ)** কণিকা ত্বরণযন্ত্রের সাহায্যে প্রাপ্ত নিউট্রন উৎস ঃ

কণিকা ত্বরণযন্ত্রের সাহায্যে প্রাপ্ত উচ্চশক্তি প্রোটন বা ডয়টেরন দ্বারা বিভিন্ন নিম্ন $Z$ সম্পন্ন মৌলকে উদ্ভাসিত করে উচ্চ তীব্রতা সম্পন্ন নিউট্রন উৎস প্রস্তুত করা যায়।

নিম্নলিখিত বিক্রিয়াগুলিকে ব্যবহার করে সাধারণতঃ এই সব নিউট্রন উৎস প্রস্তুত করা হয় ঃ

$$
\begin{array}{ll}
{}_1H^2 + {}_1H^2 & {}_2He^3 + {}_0n^1 \\
{}_1H^2 + {}_1H^3 & {}_2He^4 + {}_0n^1 \\
{}_1H^2 + {}_4Be^9 & {}_5B^{10} + {}_0n^1 \\
{}_1H^1 + {}_3Li^7 & {}_4Be^7 + {}_0n^1
\end{array}
$$

এদের মধ্যে প্রথম দুটি হচ্ছে (17·12) অনুচ্ছেদে আলোচিত $(d-d)$ এবং $(d-t)$ বিক্রিয়া। এই সব বিক্রিয়ায় বিভিন্ন দিকে নিঃসৃত নিউট্রনের শক্তি ভিন্ন হয়। অবশ্য যদি আপতিত প্রোটন বা ডয়টেরনের শক্তি খুব বেশী না হয়, তাহলে বিভিন্ন দিকে নিঃসৃত নিউট্রনগুলি প্রায় সমশক্তি সম্পন্ন হয়। বিভিন্ন প্রকার বিক্রিয়া থেকে বিভিন্ন শক্তি সম্পন্ন নিউট্রন পাওয়া যায়।

**(গ)** ফোটো নিউট্রন উৎস ঃ

$Be^9$ এর উপরে উচ্চশক্তি $\gamma$-রশ্মি বর্ষণ করলে $(\gamma, n)$ বিক্রিয়া ঘটে, যার ফলে নিউট্রন পাওয়া যায় (17·16 অনুচ্ছেদ দ্রষ্টব্য)। অনেক সময় $\gamma$-রশ্মির পরিবর্তে বীটাট্রন থেকে প্রাপ্ত উচ্চশক্তি X-রশ্মি ব্যবহার করেও এই পদ্ধতিতে নিউট্রন পাওয়া যায়। এইরূপ উৎসকে ফোটো-নিউট্রন উৎস বলা হয়।

যদি নির্দিষ্ট শক্তি সম্পন্ন $\gamma$-রশ্মি ব্যবহার করা হয়, তাহলে নিঃসৃত নিউট্রনগুলি সমশক্তি সম্পন্ন হয়। সাধারণতঃ $H^2$ এবং $Be^9$ কেন্দ্রকের উপর $(\gamma, n)$ বিক্রিয়া অনুষ্ঠিত করে এইরূপ উৎস প্রস্তুত করা হয়। এই জাতীয় উৎসের প্রধান অসুবিধা হচ্ছে যে নিউট্রনের সংগে শরীরের পক্ষে ক্ষতিকারক সুতীব্র উচ্চশক্তি $\gamma$ বা X-রশ্মি নিঃসৃত হয়। সেজন্য এগুলিকে সীসা বা অন্য কোন ভারী ধাতু নির্মিত পুরু আবরণীর দ্বারা বেষ্টন করে রাখা প্রয়োজন।

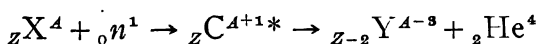
**(ঘ)** কেন্দ্রকীয় বিক্রিয়ক উৎস ঃ

বর্তমানে কেন্দ্রকীয় বিক্রিয়ক (Nuclear Reactor) যন্ত্রের মধ্যে অনুষ্ঠিত ইউরেনিয়াম বা অনুরূপ ভারী মৌলের পরমাণু কেন্দ্রক বিভাজন Nuclear Fission) প্রক্রিয়া থেকে অত্যুচ্চ তীব্রতা সম্পন্ন নিউট্রনগুচ্ছ পাওয়া যায়। এ সম্বন্ধে ঊনবিংশতিতম পরিচ্ছেদে বিস্তারিত আলোচনা করা হবে।

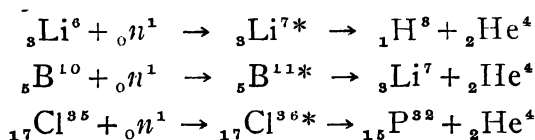
বিভিন্ন প্রকার নিউট্রন উৎস থেকে প্রাপ্ত নিউট্রনের শক্তিও বিভিন্ন হয়। উচ্চ শক্তি সম্পন্ন নিউট্রনগুলিকে যদি কোন হাইড্রোজেন সম্বলিত মাধ্যম, যথা, জল বা প্যারাফিন মোমের ভিতর দিয়ে পাঠান হয় তাহলে তারা প্রোটনের সংগে সংঘাতের ফলে দ্রুত শক্তি ক্ষয় করতে থাকে। প্রত্যেকবার হাইড্রোজেন পরমাণুর সংগে সংঘাতে নিউট্রনগুলি গড়ে তাদের আদি শক্তির প্রায় অর্ধেক হারিয়ে ফেলে। এইভাবে শক্তি হারাতে হারাতে তাদের শক্তি অবশেষে এত কমে যায় যে প্রোটনের সংগে সংঘাতের ফলে তাদের আর শক্তি

ক্ষয় হয় না। এই অবস্থায় তাদের শক্তি মাধ্যমের হাইড্রোজেন বা অন্যান্য পরমাণুগুলির তাপীয় শক্তির ($\frac{3}{2}kT$) সমান হয়ে যায়। প্রমাণ উষ্ণতায় এই শক্তির মান প্রায় 0·025 ই-ভো হয়। এইরূপ শক্তি সম্পন্ন নিউট্রনকে 'তাপীয় নিউট্রন' (Thermal Neutron) বলা হয়। মাধ্যমের পরমাণুগুলির মত তাপীয় নিউট্রনগুলির বেগ ম্যাক্স্ওয়েল বণ্টন সূত্র অনুযায়ী নির্ধারিত হয়। একটি 2 মি-ই-ভো আদি শক্তি সম্পন্ন নিউট্রনকে হাইড্রোজেনের মধ্যে সংঘাতের দ্বারা উপরোক্ত শক্তি অর্জন করতে গড়ে প্রায় আঠার বার সংঘাত লাভ করতে হয়। উচ্চতর পরমাণবিক ভর সম্পন্ন মৌলের পরমাণুর সংগে সংঘাতের ফলে নিউট্রনগুলি অপেক্ষাকৃত অনেক কম শক্তি হারায়। কাজেই খুব মন্থর গতি (Slow) নিউট্রন উৎপন্ন করার পক্ষে হাইড্রোজেন সম্বলিত বা অন্যান্য নিম্ন $A$ সম্পন্ন মাধ্যম ব্যবহার করা প্রয়োজন। এইরূপ মাধ্যমকে 'নিয়ন্ত্রক' (Moderator) বলা হয়।

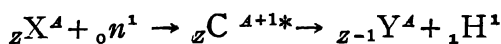
নিউট্রন দ্বারা সংঘটিত বিক্রিয়ার ফলে $\alpha$-কণিকা, প্রোটন, $\gamma$-রশ্মি ইত্যাদি বিকিরণ নিঃসৃত হতে পারে। $(n, \alpha)$ জাতীয় কেন্দ্রক বিক্রিয়াকে নিম্নলিখিত সমীকরণ দ্বারা নির্দেশিত করা যায়ঃ

$$_{Z}X^{A} + {}_{0}n^{1} \rightarrow {}_{Z}C^{A+1*} \rightarrow {}_{Z-2}Y^{A-3} + {}_{2}He^{4}$$

এই বিক্রিয়া সাধারণতঃ শক্তি-দায়ী হয়।

এই জাতীয় কয়েকটি বিক্রিয়ার নিদর্শন হচ্ছে

$$_{3}Li^{6} + {}_{0}n^{1} \rightarrow {}_{3}Li^{7*} \rightarrow {}_{1}H^{3} + {}_{2}He^{4}$$
$$_{5}B^{10} + {}_{0}n^{1} \rightarrow {}_{5}B^{11*} \rightarrow {}_{3}Li^{7} + {}_{2}He^{4}$$
$$_{17}Cl^{35} + {}_{0}n^{1} \rightarrow {}_{17}Cl^{36*} \rightarrow {}_{15}P^{32} + {}_{2}He^{4}$$

এদের মধ্যে প্রথম দুটি বিক্রিয়া সংঘটনের সম্ভাব্যতা (Probability) খুব বেশী হয়। সেজন্য এই দুটি বিক্রিয়া সাধারণতঃ নিউট্রন নির্দেশের (Detection) কাজে ব্যবহৃত হয় (17·15 অনুচ্ছেদ দ্রষ্টব্য)।

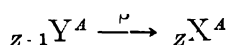
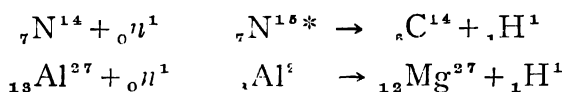
নিউট্রন বর্ষণের ফলে উৎপন্ন যৌগ-কেন্দ্রক (Compound Nucleus) যদি প্রোটন নিঃসৃত করে তাহলে $(n, p)$ জাতীয় কেন্দ্রক বিক্রিয়া সংঘটিত হয়। এইরূপ বিক্রিয়ার সাধারণ সমীকরণ হচ্ছে

$$_{Z}X^{A} + {}_{0}n^{1} \rightarrow {}_{Z}C^{A+1*} \rightarrow {}_{Z-1}Y^{A} + {}_{1}H^{1}$$

$(n, p)$ বিক্রিয়ার ফলে উৎপন্ন অবশিষ্ট কেন্দ্রকটি আদি কেন্দ্রকের একটি আইসোবার হয়, যার পরমাণবিক সংখ্যা আদি কেন্দ্রকের পরমাণবিক সংখ্যা অপেক্ষা এক একক কম হয়। উৎপন্ন কেন্দ্রকটি তেজস্ক্রিয় হয় এবং $\beta^-$ কণিকা নিঃসৃত করে আদি কেন্দ্রকে রূপান্তরিত হয় ঃ

$${}_{Z-1}Y^{A} \xrightarrow{\beta} {}_{Z}X^{A}$$

কতকগুলি $(n, p)$ বিক্রিয়ার উদাহরণ হচ্ছে ঃ

$${}_{7}N^{14} + {}_{0}n^{1} \qquad {}_{7}N^{15*} \rightarrow {}_{6}C^{14} + {}_{1}H^{1}$$

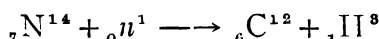
$${}_{13}Al^{27} + {}_{0}n^{1} \qquad {}_{1}Al^{2} \rightarrow {}_{12}Mg^{27} + {}_{1}H^{1}$$

$C^{14}$ এবং $Mg^{27}$ উৎপন্ন কেন্দ্রক দুটি $\beta^-$ বিঘটনশীল হয়। এদের অর্ধ-জীবনকাল যথাক্রমে প্রায় 5568 বৎসর এবং 9·6 মিনিট হয়। প্রথম বিক্রিয়াটি শক্তি-দায়ী (Exoergic) হয়। মন্থরগতি নিউট্রনের (Slow Neutrons) সাহায্যে এই বিক্রিয়া সংঘটিত করা যায়। অপেক্ষাকৃত ভারী পরমাণু সমূহের ক্ষেত্রে $(n, p)$ বিক্রিয়া সাধারণতঃ শক্তি-গ্রাহী (Endoergic) হয়।

উপরে প্রদত্ত প্রথম উদাহরণে উৎপন্ন $C^{14}$ কেন্দ্রকের অর্ধজীবনকাল খুব দীর্ঘ হয়। মহাজাগতিক রশ্মির (Cosmic Rays) মধ্যে বর্তমান নিউট্রনের দ্বারা পৃথিবীর বায়ুমণ্ডলস্থ $N^{14}$ কেন্দ্রকের বিঘটনের ফলে যে $C^{14}$ আইসোটোপ উৎপন্ন হয় লিবি (W. F. Libby) নামক আমেরিকান বিজ্ঞানী নানাবিধ নৃতাত্ত্বিক (Anthropological) এবং প্রত্নতাত্ত্বিক (Archeological) নিদর্শন বস্তুর মধ্যে তার পরিমাণ নির্ণয় করে এদের বয়স নির্ণয় করার এক নূতন পদ্ধতি আবিষ্কার করেন।

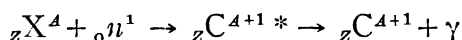
গাছপালা প্রভৃতি বিভিন্ন সজীব পদার্থ তাদের জীবদ্দশায় বায়ুমণ্ডল থেকে সালোক-সংশ্লেষ (Photosynthesis) পদ্ধতিতে যে কার্বন আহরণ করে তার মধ্যে অল্প পরিমাণ $C^{14}$ আইসোটোপও বর্তমান থাকে। মৃত্যুর পরে এরা আর $C^{14}$ আহরণ করে না। তখন $\beta$-বিঘটনের ফলে এদের দেহ মধ্যস্থ $C^{14}$ আইসোটোপের পরিমাণ ক্রমশঃ হ্রাস পেতে থাকে। লিবির পদ্ধতিতে এক খণ্ড পুরাতন কাঠের মধ্যে এবং সাম্প্রতিক কালে সংগৃহীত সমপরিমাণ অনুরূপ আর একখণ্ড কাঠের মধ্যে বর্তমান $C^{14}$ আইসোটোপের তেজস্ক্রিয়তা পরিমাপ করা হয়। এর থেকে এবং $C^{14}$ এর অর্ধজীবনকাল

থেকে কাঠের খণ্ডটি কতদিন আগে গাছ কেটে সংগৃহীত হয়েছিল, অর্থাৎ এটির বয়স কত, তা নির্ণয় করা সম্ভব। এই পদ্ধতিতে কয়েক সহস্র বৎসরের পুরাতন নিদর্শন বস্তুর বয়স নির্ণয় করা যায়।

মহাজাগতিক রশ্মি মধ্যস্থ নিউট্রনের ক্রিয়ায় বায়ুমণ্ডলে নিম্নলিখিত বিক্রিয়ার দ্বারা হাইড্রোজেনের তেজস্ক্রিয় আইসোটোপ $H^3$ অল্প পরিমাণে উৎপন্ন হয়ঃ

$$_7N^{14} + {_0n^1} \longrightarrow {_6C^{12}} + {_1H^3}$$

$H^3$ বা ট্রিটিয়াম আইসোটোপের অর্ধজীবনকাল হচ্ছে 12·4 বৎসর। এই ভাবে উৎপন্ন $H^3$ আইসোটোপ অক্সিজেনের সংগে রাসায়নিক বিক্রিয়া করে, যার ফলে প্রাকৃতিক জলের মধ্যে খুব সামান্য পরিমাণে $H_2^3O$ যৌগের অস্তিত্বের নির্দেশ পাওয়া যায়।

নিউট্রন বর্ষণের ফলে যেসব বিভিন্ন জাতীয় কেন্দ্রক বিক্রিয়া সংঘটিত হয় তার মধ্যে সর্বাপেক্ষা গুরুত্বপূর্ণ হচ্ছে নিউট্রন-আহরণ (Neutron Capture) বিক্রিয়া। এক্ষেত্রে আপতিত নিউট্রন শোষিত হবার ফলে সৃষ্ট উত্তেজিত যৌগ-কেন্দ্রক এক বা একাধিক $\gamma$-রশ্মি নিঃসৃত করে ভৌম স্তরে (Ground Level) সংক্রমণ করে। ফলে উৎপন্ন কেন্দ্রকটি আদি কেন্দ্রকের এক একক বেশী ভর-সংখ্যা সম্পন্ন একটি আইসোটোপ হয়ঃ

$$_ZX^A + {_0n^1} \rightarrow {_ZC^{A+1\,*}} \rightarrow {_ZC^{A+1}} + \gamma$$

উৎপন্ন কেন্দ্রকটি স্থায়ী হতে পারে আবার তেজস্ক্রিয়ও হতে পারে। প্রায় সমস্ত প্রাকৃতিক মৌলের ক্ষেত্রেই পরীক্ষাগারে $(n, \gamma)$ জাতীয় বিক্রিয়া অনুষ্ঠিত করা হয়েছে। $(n, \gamma)$ বিক্রিয়া সব সময়েই শক্তি-দায়ী (Exoergic) হয়; অর্থাৎ এই জাতীয় বিক্রিয়ায় $Q > 0$ হয়। সুতরাং প্রায় শূন্য শক্তি মন্থরগতি নিউট্রন ব্যবহার করেও $(n, \gamma)$ বিক্রিয়া সংঘটিত করা যায়। এইরূপ বিক্রিয়ায় $Q$-সংখ্যার মান যৌগ-কেন্দ্রকের মধ্যে একটি নিউট্রনের বন্ধন-শক্তির সমান হয়ঃ

$$Q = M(_ZX^A) + M_n - M(_ZC^{A+1})$$

কয়েকটি খুব হালকা কেন্দ্রক ছাড়া বেশীর ভাগ ক্ষেত্রেই $(n, \gamma)$ বিক্রিয়ায় $Q$-সংখ্যার মান প্রায় 8 মি-ই-ভো হয়। সেইজন্য প্রায় শূন্য শক্তি সম্পন্ন নিউট্রনের দ্বারা সংঘটিত $(n, \gamma)$ বিক্রিয়ার ফলে নিঃসৃত $\gamma$-রশ্মির শক্তি সাধারণতঃ 8 মি-ই-ভো পর্যন্ত হয়।

১৯৩৪ সালে প্রখ্যাত ইতালীয়ান বিজ্ঞানী ফের্মি এবং তাঁর সহকর্মীবৃন্দ,

আমাল্‌ডি, দ্য' আগস্তিনো, রাসেটি ও সেগ্রে (E. Fermi, E. Amaldi, O. D'Agostino, F. Rasetti and E. Segrè) লক্ষ্য করেন যে আপতিত নিউট্রনগুলি যদি খুব মন্থরগতি, অর্থাৎ প্রায় শূন্য শক্তি সম্পন্ন হয়, তাহলে $(n, \gamma)$ বিক্রিয়া ঘটার সম্ভাব্যতা খুব বেশী হয়। তাঁরা একটি Ra-Be নিউট্রন উৎসকে জল বা প্যারাফিন মোমের মধ্যে স্থাপিত করে মন্থরগতি নিউট্রন (Slow Neutrons) উৎপন্ন করেন। পর্যায় সারণীর (Periodic Table) প্রায় সমস্ত মৌলের উপর তাঁরা এইরূপ মন্থরগতি নিউট্রন বর্ষণ করেন। অনেক ক্ষেত্রে উৎপন্ন অবশিষ্ট কেন্দ্রক তেজস্ক্রিয় হয়। এদের তেজস্ক্রিয়তা পরিমাপ করে তাঁরা সিদ্ধান্ত করেন যে $(n, \gamma)$ বিক্রিয়া অনুষ্ঠিত করার পক্ষে দ্রুতগতি নিউট্রনের তুলনায় মন্থরগতি নিউট্রন অনেক ক্ষেত্রে কয়েক সহস্র গুণ পর্যন্ত বেশী কার্যকরী হয়। তাঁদের এই আবিষ্কার কৃত্রিম পদ্ধতিতে তেজস্ক্রিয় পদার্থ উৎপাদনের ক্ষেত্রে এক নূতন যুগ সূচিত করে।

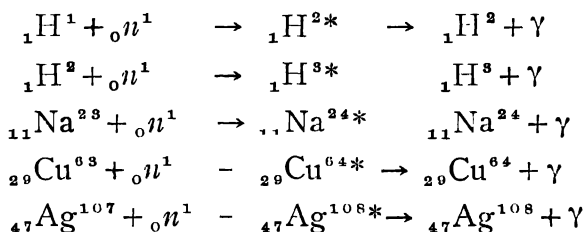
কয়েকটি $(n, \gamma)$ জাতীয় বিক্রিয়ার নিদর্শন হচ্ছে ঃ

$$_{1}H^{1} + {}_{0}n^{1} \rightarrow {}_{1}H^{2*} \rightarrow {}_{1}H^{2} + \gamma$$

$$_{1}H^{2} + {}_{0}n^{1} \rightarrow {}_{1}H^{3*} \quad {}_{1}H^{3} + \gamma$$

$$_{11}Na^{23} + {}_{0}n^{1} \rightarrow {}_{11}Na^{24*} \quad {}_{11}Na^{24} + \gamma$$

$$_{29}Cu^{63} + {}_{0}n^{1} - {}_{29}Cu^{64*} \rightarrow {}_{29}Cu^{64} + \gamma$$

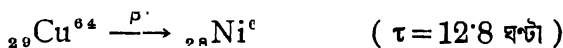
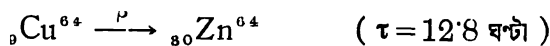
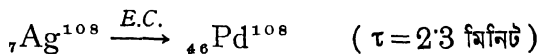
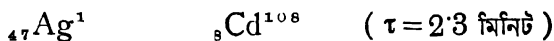
$$_{47}Ag^{107} + {}_{0}n^{1} - {}_{47}Ag^{108*} \rightarrow {}_{47}Ag^{108} + \gamma$$

প্রথম ক্ষেত্রে উৎপন্ন $H^2$ একটি স্থায়ী কেন্দ্রক। অপরপক্ষে $H^3$ এবং $Na^{24}$ কেন্দ্রকদ্বয় $\beta^-$ বিঘটনশীল। এদের তেজস্ক্রিয়তা সম্বন্ধে 239 ও 237 পৃষ্ঠায় আলোচনা করা হয়েছে। অন্য দুটির মধ্যে $Cu^{64}$ কেন্দ্রকটির $\beta^-$ এবং $\beta^+$ উভয় প্রকার তেজস্ক্রিয়তাই দেখা যায় ; তাছাড়া এটি কক্ষীয় ইলেকট্রন আহরণ করেও রূপান্তরিত হয়। পরিশেষে $Ag^{108}$ $\beta^-$ বিঘটনশীলও হয়, আবার কক্ষীয় ইলেকট্রন আহরণ করেও রূপান্তরিত হয় ঃ

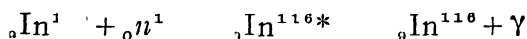
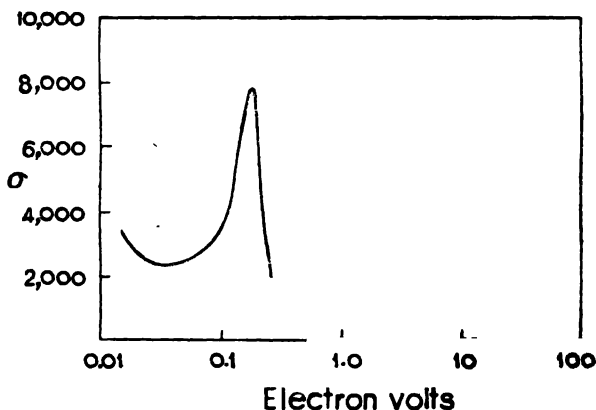
$$_{9}Cu^{64} \xrightarrow{\beta} {}_{30}Zn^{64} \qquad (\tau = 12{\cdot}8 \text{ ঘণ্টা})$$

$$_{29}Cu^{64} \xrightarrow{\beta} {}_{28}Ni^{c} \qquad (\tau = 12{\cdot}8 \text{ ঘণ্টা})$$

$$_{9}Cu^{64} \xrightarrow{E.C.} {}_{28}Ni^{64} \qquad (\tau = 12{\cdot}8 \text{ ঘণ্টা})$$

$${}_{47}\mathrm{Ag}^{1} \qquad {}_{8}\mathrm{Cd}^{108} \qquad (\tau = 2{\cdot}3 \text{ মিনিট})$$

$${}_{7}\mathrm{Ag}^{108} \xrightarrow{E.C.} {}_{46}\mathrm{Pd}^{108} \qquad (\tau = 2{\cdot}3 \text{ মিনিট})$$

কোন কোন ক্ষেত্রে আপতিত নিউট্রনের শক্তির কতকগুলি বিশেষ মানে একটি মৌল কর্তৃক নিউট্রন শোষিত হবার সম্ভাব্যতা খুব উচ্চ হয়। এই জাতীয় অনুনাদী-আহরণের (Resonance Capture) একটি নিদর্শন হচ্ছে

$${}_{0}\mathrm{In}^{1} + {}_{0}n^{1} \qquad \mathrm{In}^{116*} \qquad {}_{9}\mathrm{In}^{116} + \gamma$$

আপতিত নিউট্রনের শক্তি $E_n = 1{\cdot}44$ ই-ভো হলে এই বিক্রিয়া সংঘটিত হবার সম্ভাব্যতা হঠাৎ বহু সহস্রগুণ বৃদ্ধি পায় ( 17·9 চিত্র দ্রষ্টব্য )।

চিত্র 17·9

অনুনাদী আহরণ বিক্রিয়ার ক্ষেত্রে নিউট্রন শক্তির সংগে বিক্রিয়া প্রস্থচ্ছেদ পরিবর্তনের লেখচিত্র। কোটি অভিমুখে প্রস্থচ্ছেদের একক হচ্ছে বার্ন।

নিউট্রন বর্ষণের ফলে সৃষ্ট যৌগ-কেন্দ্রক থেকে অনেক সময় পরপর দুটি নিউট্রন নিঃসৃত হতে দেখা যায়। এইরূপ বিক্রিয়াকে $(n, 2n)$ বিক্রিয়া আখ্যা দেওয়া হয়। এক্ষেত্রে আপতিত নিউট্রনের শক্তি যথেষ্ট উচ্চ হওয়া প্রয়োজন। শুধু নিউট্রন নয়, প্রোটন, $\alpha$-কণিকা ইত্যাদি বর্ষণের ফলেও অনুরূপ বিঘটন অনুষ্ঠিত হয়। আপতিত কণিকার শক্তি যথেষ্ট উচ্চ হলে শুধু দুটি কণিকা ( যথা $2n$, $2p$ ইত্যাদি ) নিঃসারক বিঘটন ছাড়াও তিন বা ততোধিক কণিকা নিঃসারক বিঘটনও অনুষ্ঠিত হয়।

মন্থরগতি নিউট্রনের ক্ষেত্রে $(n, \gamma)$ বিক্রিয়ার খুব উচ্চ সম্ভাব্যতাকে কাজে লাগিয়ে নিউট্রন শোষক (Neutron Absorber) প্রস্তুত করা হয়। ক্যাড্‌মিয়াম $(Z=48)$ মৌলের ক্ষেত্রে এইভাবে নিউট্রন শোষণের সম্ভাব্যতা খুব উচ্চ হয়। সুতরাং ক্যাড্‌মিয়াম ধাতুর পাত তাপীয় নিউট্রনের (Thermal Neutrons) শোষক হিসাবে ব্যবহার করা হয়। তাছাড়া বোরন $(Z=5)$ এবং হ্যাফ্‌নিয়াম $(Z=72)$ মৌল দুটিও এই কাজের পক্ষে বিশেষ উপযোগী।

নিউট্রনের দ্বারা আর একটি খুব গুরুত্বপূর্ণ বিক্রিয়া সংঘটিত হয়। তা হচ্ছে কেন্দ্রক-বিভাজন (Nuclear Fission) বিক্রিয়া। এ সম্বন্ধে ঊনবিংশতিতম পরিচ্ছেদে বিস্তারিত আলোচনা করা হবে।

## 17·15 : নিউট্রন নির্দেশক

প্রোটন, α-কণিকা, ডয়টেরন প্রভৃতি আহিত কণিকা নির্দেশের জন্য সাধারণতঃ এদের আয়ন উৎপাদন ধর্ম ব্যবহার করা হয়। আধানহীন হওয়ার জন্য নিউট্রনকে এই পদ্ধতিতে নির্দেশ করা সম্ভব নয়। নিউট্রন দ্বারা সংঘটিত বিভিন্ন প্রকার আহিত কণিকা উৎপাদনকারী কেন্দ্রক বিক্রিয়ার সাহায্যে সাধারণতঃ নিউট্রন নির্দেশ করা হয়। তাছাড়া হাইড্রোজেন সম্বলিত পদার্থ থেকে নিউট্রনের আঘাতে প্রতিক্ষিপ্ত প্রোটনের সাহায্যেও নিউট্রন নির্দেশ করা যায়। নিম্নে আলোচিত বিভিন্ন পদ্ধতিতে নিউট্রন নির্দেশ (Detection) করা হয়ে থাকে।

**(ক)** (17·14) অনুচ্ছেদে আলোচিত $Li^6(n, \alpha)H^3$ এবং $B^{10}(n, \alpha)Li^7$ বিক্রিয়া দুটি ব্যবহার করে নিউট্রন নির্দেশ করা যায়। এই দুটি বিক্রিয়া ঘটার সম্ভাব্যতা (Probability) খুব বেশী হয়। একটি আনুপাতিক সংখ্যায়ক (Proportional Counter) বা আয়নন কক্ষের ভিতরের গাত্রে লিথিয়াম বা বোরনের কোন যৌগ প্রলিপ্ত করে রাখলে এদের উপরে আপতিত নিউট্রনগুলি কয়েক মি-ই-ভো শক্তির α-কণিকা এবং অন্য একটি আহিত কণিকা ($H^3$ বা $Li^7$) নিঃসৃত করে। এদের মধ্যে যে কোন একটি কণিকা আনুপাতিক সংখ্যায়ক বা আয়নন কক্ষের গ্যাসের মধ্যে ভ্রমণ কালে আয়নন প্রবাহ উৎপন্ন করে। এই আয়নন প্রবাহ ইলেকট্রমিটারের সাহায্যে বা ইলেকট্রনিক পদ্ধতিতে নির্দেশিত করা যায়। বর্তমানে অনেক সময় প্রাকৃতিক লিথিয়াম (7·52% $Li^6$ ও 92·48% $Li^7$) বা প্রাকৃতিক বোরনের (18·7% $B^{10}$ ও 81·3% $B^{11}$) পরিবর্তে পৃথকীকৃত $Li^6$ বা $B^{10}$

আইসোটোপ ব্যবহার করে এইরূপ নিউট্রন নির্দেশক (Detector) নির্মাণ করা হয়। কারণ $Li^6$ এবং $B^{10}$ আইসোটোপ দুটির সংগে নিউট্রনের বিক্রিয়ার সম্ভাব্যতা খুব উচ্চ হয়। এছাড়া বোরনের গ্যাসীয় যৌগ $BF_3$ দ্বারা পূর্ণ আয়নন কক্ষ বা আনুপাতিক সংখ্যায়কও নিউট্রন নির্দেশের কাজে ব্যবহৃত হয়। এক্ষেত্রে নিউট্রন দ্বারা $(n, \alpha)$ বিক্রিয়ার সংঘটন এবং এই বিক্রিয়ার ফলে নিঃসৃত আহিত কণিকা ($\alpha$ অথবা $Li^7$) কর্তৃক আয়নন উৎপাদন, উভয় প্রক্রিয়াই $BF_3$ গ্যাসের মধ্যে ঘটতে পারে। প্রাকৃতিক বোরনের পরিবর্তে পৃথকীকৃত $B^{10}$ সম্বলিত $BF_3$ গ্যাস ব্যবহার করে এইরূপ নির্দেশকের নির্দেশ ক্ষমতা (Efficiency) যথেষ্ট বৃদ্ধি করা সম্ভব।

এখানে উল্লেখযোগ্য যে এই পদ্ধতি মন্থর গতি নিউট্রন নির্দেশের পক্ষে বিশেষভাবে সহায়ক। উপরোক্ত বিক্রিয়া দুটির প্রস্থচ্ছেদ নিউট্রনের বেগের ব্যস্তানুপাতিক $\left(\sigma \propto \dfrac{1}{v}\right)$। সুতরাং উচ্চতর শক্তির নিউট্রনের ক্ষেত্রে নির্দেশ ক্ষমতা হ্রাস পায়।

**(খ)** সক্রিয়করণ পদ্ধতি : নিউট্রন দ্বারা সংঘটিত কেন্দ্রক রূপান্তরের ফলে সৃষ্ট তেজস্ক্রিয় পদার্থের তেজস্ক্রিয়তা পরিমাপ করে নিউট্রন নির্দেশ করা সম্ভব। এই পদ্ধতিকে 'সক্রিয়করণ পদ্ধতি' (Activation Method) বলা যায়। $(n, \gamma)$ বিক্রিয়া এই পদ্ধতির পক্ষে বিশেষ উপযোগী। (17·14) অনুচ্ছেদে দেখা গেছে যে মন্থর গতি নিউট্রন দ্বারা $(n, \gamma)$ বিক্রিয়া অনুষ্ঠানের সম্ভাব্যতা খুব উচ্চ হয়। সাধারণতঃ ম্যাংগানীজ় $(Z=25)$, রোডিয়াম $(Z=43)$, রূপা $(Z=47)$, ইন্ডিয়াম $(Z=49)$, ডিস্প্রোসিয়াম $(Z=66)$, সোনা $(Z=79)$ প্রভৃতি মৌল এই কাজের পক্ষে বিশেষ উপযোগী। এদের পাতের উপর নিউট্রন বর্ষণ করলে $(n, \gamma)$ বিক্রিয়া দ্বারা এদের তেজস্ক্রিয় আইসোটোপের সৃষ্টি হয়। গাইগার-মূলার বা অনুরূপ সংখ্যায়কের সাহায্যে এই তেজস্ক্রিয়তা পরিমাপ করে নিউট্রন নির্দেশ এবং অনেক সময়ে আপতিত নিউট্রনগুচ্ছের তীব্রতা (Intensity) নিরূপণ করা যায়।

কোন কোন মৌলের ক্ষেত্রে আপতিত নিউট্রনের বিশেষ বিশেষ শক্তিতে $(n, \gamma)$ বিক্রিয়ার প্রস্থচ্ছেদ (Cross Section) খুব উচ্চ হয়। (17·14) অনুচ্ছেদে এইরূপ অনুনাদ বিক্রিয়া (Resonance Reaction) সম্বন্ধে আলোচনা করা হয়েছে। উদাহরণস্বরূপ ইন্ডিয়ামের ক্ষেত্রে 1·44 ই-ভো নিউট্রন দ্বারা $In^{115}(n, \gamma)\, In^{116}$ বিক্রিয়া সংঘটনের সম্ভাব্যতা খুব উচ্চ

হয়। সুতরাং ইন্‌ডিয়ামের পাত নিউট্রন দ্বারা উদ্‌ভাসিত করে এবং সৃষ্ট $In^{116}$ আইসোটোপের তেজস্ক্রিয়তা ( $\tau = 54$ মিনিট ) পরিমাপ করে আপতিত 1·44 ই-ভো নিউট্রনগুচ্ছের তীব্রতা নিরূপণ করা যায়। অর্থাৎ এইরূপ অনুনাদ শোষণ বিক্রিয়া বিশেষ বিশেষ শক্তি সম্পন্ন নিউট্রন নির্দেশের কাজে ব্যবহার করা যায়।

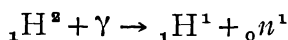
**(গ)** বিভাজন-নির্দেশক ঃ নিউট্রন কর্তৃক সংঘটিত কেন্দ্রক বিভাজন (Nuclear Fission) বিক্রিয়া ব্যবহার করে নিউট্রন নির্দেশ করা যায়। ইউরেনিয়াম, থোরিয়াম প্রভৃতি ভারী মৌলসমূহের কেন্দ্রক নিউট্রন বর্ষণের ফলে প্রায় সমভর সম্পন্ন দুটি খণ্ডে বিভাজিত হয়ে যায়। এই বিভাজন-খণ্ডগুলি (Fission Fragments) অতি উচ্চ গতিশক্তি সহকারে নিঃসৃত হয় এবং এরা গ্যাসের মধ্যে তীব্র আয়নন প্রবাহ উৎপন্ন করতে পারে। সুতরাং একটি আয়নন কক্ষ বা আনুপাতিক সংখ্যায়কের ভিতরের গাত্রে যদি ইউরেনিয়াম বা থোরিয়ামের কোন যৌগের প্রলেপ লাগান থাকে, তাহলে এই যন্ত্রগুলিকে নিউট্রন নির্দেশের কাজে লাগান যায়। কেন্দ্রক বিভাজন সম্বন্ধে ঊনবিংশতিতম পরিচ্ছেদে সবিস্তার আলোচনা করা হবে। এই পদ্ধতিতে নিম্নশক্তি এবং উচ্চশক্তি উভয় প্রকার নিউট্রন নির্দেশ করা যায়।

**(ঘ)** প্রতিক্ষিপ্ত প্রোটন পদ্ধতি ঃ (17·6) অনুচ্ছেদে নিউট্রন আবিষ্কার আলোচনা প্রসংগে দেখা গেছে যে আপতিত নিউট্রনের আঘাতে হাইড্রোজেন সম্বলিত পদার্থ থেকে প্রোটন নিঃসৃত হয়। এই প্রতিক্ষিপ্ত (Recoil) প্রোটনগুলিকে আনুপাতিক সংখ্যায়ক বা আয়নন কক্ষের সাহায্যে নির্দেশ করা যায়। এই পদ্ধতিতে সাধারণতঃ উচ্চশক্তি নিউট্রন নির্দেশিত হয়।

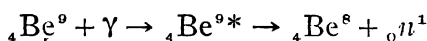
## 17·16 : $\gamma$-রশ্মি দ্বারা সংঘটিত কেন্দ্রক বিক্রিয়া

যথেষ্ট উচ্চ শক্তি সম্পন্ন $\gamma$-রশ্মি যদি কোন কেন্দ্রকের মধ্যে প্রবেশ করে, তাহলে কেন্দ্রকটি $\gamma$-ফোটনের শক্তি শোষণ করে উচ্চতর শক্তিস্তরে (Energy Level) উন্নীত হতে পারে। এর উত্তেজনা শক্তি (Excitation Energy) যদি কেন্দ্রক মধ্যস্থ একটি কণিকার বন্ধন শক্তি অপেক্ষা উচ্চতর হয়, তাহলে কেন্দ্রকটি উক্ত কণিকা নিঃসৃত করে বিঘটিত হবে। যদি নিঃসৃত কণিকাটি নিউট্রন হয়, তাহলে সংঘটিত বিক্রিয়াকে $(\gamma, n)$ বিক্রিয়া বলা যেতে পারে। $(\gamma, n)$ বিক্রিয়া শক্তি-গ্রাহী হয়।

উদাহরণস্বরূপ (17·7) অনুচ্ছেদে আলোচিত γ-রশ্মির দ্বারা ডয়টেরনের বিঘটন বিবেচনা করা যেতে পারে :

$$_1H^2 + \gamma \rightarrow {}_1H^1 + {}_0n^1$$

ডয়টেরনের বন্ধন-শক্তি 2·226 মি-ই-ভো অপেক্ষা উচ্চতর শক্তি সম্পন্ন γ-রশ্মি দ্বারা এই বিক্রিয়া সংঘটিত করা সম্ভব। প্রকৃতিলব্ধ ThC″ আইসোটোপ থেকে নিঃসৃত 2·62 মি-ই-ভো γ-রশ্মি অথবা কৃত্রিম পদ্ধতিতে উৎপন্ন $Na^{24}$ আইসোটোপ নিঃসৃত 2·76 মি-ই-ভো γ-রশ্মি ব্যবহার করে এই বিক্রিয়া অনুষ্ঠিত করা যায়। তাছাড়া বীটাট্রন বা ইলেকট্রন-সিংক্রট্রন জাতীয় ইলেকট্রন-ত্বরণযন্ত্র (Electron Accelerator) থেকে প্রাপ্ত উচ্চশক্তি X-রশ্মি ব্যবহার করেও এই জাতীয় বিক্রিয়া সংঘটিত করা যায়।

আর একটি উদাহরণ হচ্ছে

$$_4Be^9 + \gamma \rightarrow {}_4Be^{9*} \rightarrow {}_4Be^8 + {}_0n^1$$

এই বিক্রিয়ার সূচনা শক্তি (Threshold Energy) হচ্ছে 1·66 মি-ই-ভো।

সোডিয়ামের $Na^{24}$ আইসোটোপ অথবা অ্যাণ্টিমনি মৌলের $Sb^{124}$ আইসোটোপ থেকে নিঃসৃত γ-রশ্মি ব্যবহার করে সাধারণতঃ এই বিক্রিয়া অনুষ্ঠিত করা হয়। উপরোক্ত বিক্রিয়া দুটি ফোটো-নিউট্রন উৎস নির্মাণের কাজে ব্যবহার করা হয় (17·14 অনুচ্ছেদ দ্রষ্টব্য)।

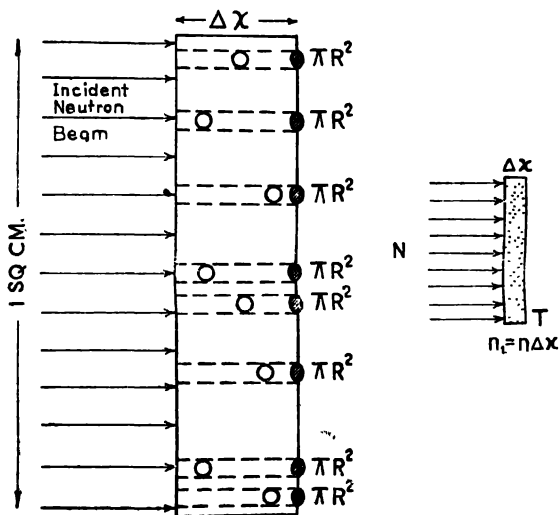
$(\gamma, n)$ ছাড়াও $(\gamma, p)$, $(\gamma, \alpha)$ প্রভৃতি বিক্রিয়ার নিদর্শন পাওয়া যায়।

## 17·17 : কেন্দ্রক বিক্রিয়ার প্রস্থচ্ছেদ :

কোন কেন্দ্রক বিক্রিয়ার সম্ভাব্যতা নির্দেশ করা হয় সাধারণতঃ বিক্রিয়া-প্রস্থচ্ছেদ (Reaction Cross Section) নামক সংখ্যার দ্বারা। বিভিন্ন প্রকার পরমাণবিক বা কেন্দ্রকীয় প্রক্রিয়ার প্রস্থচ্ছেদের অনুরূপে আমরা কেন্দ্রক বিক্রিয়া প্রস্থচ্ছেদের নিম্নলিখিত সংজ্ঞা দিতে পারি।

(17·10) চিত্রে প্রদর্শিত $\Delta x$ বেধ সম্পন্ন T লক্ষ্যবস্তুর (Target) পাতের উপরে যদি প্রতি সেকেণ্ডে $N$ সংখ্যক প্রক্ষিপ্ত কণিকা (Projectile) আপতিত হয়, তাহলে কোন নির্দিষ্ট প্রকার বিঘটনের ফলে প্রতি সেকেণ্ডে লক্ষ্যবস্তুর মধ্যে বিঘটিত কেন্দ্রকের সংখ্যা হবে

$$\Delta n = \sigma N n \Delta x = \sigma N n_1 \qquad (17·21)$$

এখানে $n$ হচ্ছে লক্ষ্যবস্তু মধ্যে নির্দিষ্ট প্রকার কেন্দ্রকের সংখ্যা-ঘনত্ব। স্পষ্টতঃ $n_1 = n\Delta x$ হচ্ছে লক্ষ্যবস্তুর একক ক্ষেত্রফলে বর্তমান উক্ত প্রকার

চিত্র 17·10

সংঘাত প্রস্থচ্ছেদ ( অথবা বিক্রিয়া প্রস্থচ্ছেদ ) ব্যাখ্যার জন্য জ্যামিতিক চিত্ররূপ। প্রত্যেকটি বৃত্ত এক একটি গোলকাকৃতি কেন্দ্রক নির্দেশ করে। প্রত্যেকটি কেন্দ্রকের পিছনে চিত্রতলের অভিলম্বে অবস্থিত সমতলে কেন্দ্রকগুলির প্রক্ষিপ্ত ক্ষেত্রফল দেখান হয়েছে। পাশের অন্তর্ভুক্ত চিত্রে পরীক্ষা ব্যবস্থার সরল নকশা দেখান হয়েছে।

কেন্দ্রকের সংখ্যা। $\sigma$ একটি ধ্রুবক, যাকে বলা হয় কেন্দ্রক বিক্রিয়া প্রস্থচ্ছেদ (Cross Section of Nuclear Rection)। বিভিন্ন প্রকার বিক্রিয়ার জন্য বিক্রিয়া প্রস্থচ্ছেদগুলি, যথা $\sigma(p, n)$, $\sigma(n, p)$, $\sigma(n, \gamma)$ ইত্যাদি পরস্পরের থেকে ভিন্ন হয়।

যদি কোন লক্ষ্যবস্তুর উপরে একটি মাত্র কণিকা আপতিত হয় এবং এর একক ক্ষেত্রফলে একটি মাত্র কেন্দ্রক থাকে, তাহলে উক্ত কেন্দ্রকের বিঘটিত হবার সম্ভাব্যতা $\sigma$ হবে। ক্ষেত্রফলের যা একক, $\sigma$ সংখ্যাটিরও একক তাই—অর্থাৎ $C.G.S.$ পদ্ধতিতে এর একক হচ্ছে সেমি$^2$। যেহেতু কেন্দ্রকের ব্যাসার্ধ $10^{-12}$ সেমি অপেক্ষা কম হয়, সেইজন্য বিক্রিয়া প্রস্থচ্ছেদের মান

সাধারণতঃ $10^{-24}$ সেমি$^2$ মাত্রা সম্পন্ন হয়। নির্দেশের সুবিধার জন্য বিক্রিয়া প্রস্থচ্ছেদের জন্য একটি নূতন একক ব্যবহার করা হয়। এর নাম হচ্ছে বার্ন (Barn) ঃ

$$1 \text{ বার্ন} = 10^{-24} \text{ সেমি}^2$$

যদিও বেশীর ভাগ কেন্দ্রক বিক্রিয়ার ক্ষেত্রে বিক্রিয়া প্রস্থচ্ছেদ মাত্র কয়েক বার্ন যা আরও কম হয়, মন্থর-গতি নিউট্রনের দ্বারা সংঘটিত $(n, \gamma)$ বিক্রিয়ার ক্ষেত্রে প্রস্থচ্ছেদ $\sigma(n, \gamma)$ কোন কোন ক্ষেত্রে কয়েক সহস্র বার্ন পর্যন্ত হয়। অনুনাদী আহরণের (Resonance Capture) ক্ষেত্রেও প্রস্থচ্ছেদ খুব উচ্চ হয়। (17·14) অনুচ্ছেদে আলোচিত $\text{In}^{115}(n, \gamma)\ \text{In}^{116}$ বিক্রিয়ার ক্ষেত্রে $E_n = 1{\cdot}44$ ই-ভো হলে, $\sigma(n, \gamma) = 24{,}000$ বার্ন হয়।

বিক্রিয়া প্রস্থচ্ছেদের জ্যামিতিক তাৎপর্য নিম্নলিখিত উপায়ে প্রতীয়মান হয়। একটি কেন্দ্রকের ব্যাসার্ধ যদি হয় $R$, তাহলে আপতিত কণিকাগুলির গতির অভিলম্বে স্থাপিত একটি সমতলের উপরে এর প্রক্ষিপ্ত (Projected) ক্ষেত্রফল $\pi R^2$ হবে। যদি কোন পরীক্ষাধীন পাতের একক ক্ষেত্রফলের উপরে $N$ সংখ্যক কেন্দ্রকীয় কণিকা আপতিত হয়, তাহলে পাতের মধ্য দিয়ে পরিভ্রমণ কালে মোট $\pi R^2 N$ সংখ্যক আপতিত কণিকা প্রতিটি কেন্দ্রকের সম্মুখীন হয়। এখানে আপতিত কণিকাগুলিকে বিন্দুসদৃশ কল্পনা করা হয়েছে। যদি পাতের মধ্যে প্রতি একক ক্ষেত্রফলে মোট $n_1$ সংখ্যক কেন্দ্রক থাকে, তাহলে এর ভিতর দিয়ে পরিভ্রমণ কালে এই ভাবে বাধা প্রাপ্ত আপতিত কণিকার মোট সংখ্যা $\pi R^2 N n_1$ হবে ( 17·10 চিত্র দ্রষ্টব্য )। সুতরাং আপতিত কণিকাগুলি এবং পাত মধ্যস্থ কেন্দ্রকসমূহের মধ্যে বিক্রিয়ার সম্ভাব্যতা হবে

$$\pi R^2 N n_1 : N = \pi R^2 n_1$$

অতএব একক ক্ষেত্রফলে আপতিত একটি কণিকা এবং একটি মাত্র কেন্দ্রকের মধ্যে বিক্রিয়ার সম্ভাব্যতা ( অর্থাৎ বিক্রিয়া প্রস্থচ্ছেদ ) $\pi R^2$ বা কেন্দ্রকের প্রক্ষিপ্ত ক্ষেত্রফলের সমান হয়। প্রকৃতপক্ষে কিন্তু এই সম্ভাব্যতা কেন্দ্রকের প্রক্ষিপ্ত জ্যামিতিক ক্ষেত্রফলের ঠিক সমান হয় না। কারণ কণিকা এবং কেন্দ্রকের মধ্যে বিক্রিয়ার সম্ভাব্যতা তাদের মধ্যে ক্রিয়াশীল বল, আপতিত কণিকার শক্তি প্রভৃতির উপরে নির্ভর করে। তাছাড়া আপতিত কণিকাটিও প্রকৃতপক্ষে বিন্দুসদৃশ হয় না। সুতরাং বিক্রিয়া প্রস্থচ্ছেদ কণিকাটির

ক্ষেত্রফলের উপরেও নির্ভর করে। বস্তুতঃ নিম্নশক্তি কণিকার ক্ষেত্রে আপতিত কণিকাগুলির দ্যব্রয় তরঙ্গদৈর্ঘ্য খুব দীর্ঘ হয়। ফলে এদের জ্যামিতিক ক্ষেত্রফলের তুলনায় প্রকৃত বিস্তার অনেক বেশী হয়। সেইজন্য মন্থর-গতি নিউট্রন দ্বারা উৎপন্ন বিক্রিয়ার প্রস্থচ্ছেদ খুব উচ্চ হয়।

উপরের আলোচনায় অনুমান করা হয়েছে যে পরীক্ষাধীন পাতের একক ক্ষেত্রফলের মধ্যে বর্তমান $n_1$ সংখ্যক কেন্দ্রকের মোট প্রক্ষিপ্ত ক্ষেত্রফল $\pi R^2 n_1$ পাতের ক্ষেত্রফলের (1 সেমি$^2$) তুলনায় খুব কম হয়। পাতটি খুব পাতলা হলেই এইরূপ হওয়া সম্ভব।

## 17·18 : বিক্রিয়ার দ্বারা সৃষ্ট কেন্দ্রক উৎপাদনের পরিমাণ

যদি কোন বিশেষ প্রকার বিক্রিয়ার ফলে উৎপন্ন কেন্দ্রক স্থায়ী (Stable) হয়, তাহলে সময়ের সংগে উক্ত কেন্দ্রকের উৎপাদন (Yield) একঘাতে বৃদ্ধি পায়। (17·21) সমীকরণ থেকে অবশিষ্ট কেন্দ্রকের উৎপাদন হার পাওয়া যায়। স্পষ্টতঃ $t$ সেকেণ্ড পরে উৎপন্ন স্থায়ী কেন্দ্রকের সংখ্যা $\sigma N n_1 t$ হবে।

অপরপক্ষে যদি অবশিষ্ট কেন্দ্রক তেজস্ক্রিয় হয়, তাহলে উৎপন্ন হওয়ার পর এই কেন্দ্রকগুলি নির্দিষ্ট হারে বিঘটিত হতে থাকবে। যদি এর বিঘটন ধ্রুবক (Disintegration Constant) $\lambda$ হয়, এবং কোন নির্দিষ্ট মুহূর্তে যদি $N'$ সংখ্যক অবশিষ্ট কেন্দ্রক লক্ষ্যবস্তুর মধ্যে বর্তমান থাকে, তাহলে উক্ত মুহূর্তে বিঘটন হার $\lambda N'$ হবে। সুতরাং $N'$ সংখ্যাটির মোট পরিবর্তন হার হবে

$$\frac{dN'}{dt} = \sigma N n_1 - \lambda N' \qquad (17·22)$$

অথবা
$$\frac{dN'}{N' - \dfrac{\sigma N n_1}{\lambda}} = -\lambda dt$$

এই সমীকরণ সমাকলন করলে পাওয়া যায়

$$N' - \frac{\sigma N n_1}{\lambda} = A e^{-\lambda t}$$

এখানে $A$ একটি ধ্রুবক। যদি শুরুতে, অর্থাৎ $t = 0$ সময়ে $N' = 0$ হয়, তাহলে পাওয়া যায়

$$A = -\sigma N n_1 / \lambda$$

সুতরাং আমরা পাই

$$N' = \frac{\sigma N n_1}{\lambda}(1 - e^{-\lambda t}) \tag{17·23}$$

N'

$N'_\infty$

t

চিত্র 17·11

সময়ের সংগে কেন্দ্রকীয় বিক্রিয়ার ফলে উৎপন্ন তেজস্ক্রিয় কেন্দ্রকের সংখ্যা পরিবর্তন লেখচিত্র।

অর্থাৎ উৎপন্ন কেন্দ্রকের সংখ্যা সূচক-সূত্র (Exponential Law) অনুযায়ী বৃদ্ধি পেতে পেতে দীর্ঘ সময় পরে ($t = \infty$) সম্পৃক্ত (Saturated) হয়ে যায় ( 17·11 চিত্র দ্রষ্টব্য )। সম্পৃক্ত সংখ্যা হচ্ছে

$$N_\infty' = \frac{\sigma N n_1}{\lambda} \tag{17·24}$$

বাস্তব ক্ষেত্রে দশ-বার অর্ধজীবনকাল পরে অবশিষ্ট কেন্দ্রকের সংখ্যা প্রায় সম্পৃক্ত হয়ে যায়।

যত দীর্ঘ সময় ধরেই বিক্রিয়া চালান হোক না কেন, $N_\infty'$ অপেক্ষা অধিকতর সংখ্যক অবশিষ্ট কেন্দ্রক উৎপন্ন হতে পারে না। বিক্রিয়া প্রস্থচ্ছেদ $\sigma$ যত বেশী হয়, $N_\infty'$ তত বেশী হয়। স্পষ্টতঃ মন্থরগতি নিউট্রন ব্যবহার করে $N_\infty'$ সংখ্যাটিকে বাড়ান যায়, কারণ প্রস্থচ্ছেদ $\sigma$ এক্ষেত্রে বৃদ্ধি পায়। উৎপন্ন কেন্দ্রকের বিঘটন ধ্রুবক $\lambda$ বেশী হলে, অর্থাৎ অর্ধজীবনকাল $\tau$ কম হলে, উৎপন্ন কেন্দ্রকের সংখ্যা অপেক্ষাকৃত কম হয়। অপরপক্ষে বিঘটন ধ্রুবক $\lambda$ কম হলে, অর্থাৎ $\tau$ বেশী হলে $N_\infty'$ বৃদ্ধি পায়। প্রক্ষিপ্ত কণিকার আপতন হার $N$ বৃদ্ধি করেও $N_\infty'$ বৃদ্ধি করা যায়।

উদাহরণস্বরূপ $Au^{197}(n, \gamma)Au^{198}$ বিক্রিয়ার কথা বিবেচনা করা যাক। এই বিক্রিয়ার জন্য তাপীয় নিউট্রন প্রস্থচ্ছেদ (Thermal Neutron Cross Section) হচ্ছে প্রায় 100 বার্ন এবং $Au^{198}$ কেন্দ্রকের অর্ধ-জীবনকাল হচ্ছে 2·7 দিন। যদি এক সেমি$^2$ প্রস্থচ্ছেদ এবং ·02 সেমি বেধ-সম্পন্ন একটি সোনার পাতের উপরে একটি কেন্দ্রকীয় বিক্রিয়ক (Nuclear Reactor) থেকে প্রতি সেকেণ্ডে $10^{12}$ সংখ্যক নিউট্রন বর্ষণ করা হয়, তাহলে দীর্ঘ সময় পরে উৎপন্ন $Au^{198}$ কেন্দ্রকের মোট সংখ্যা হবে ( $\because$ সোনার আপেক্ষিক গুরুত্ব $= 19{\cdot}3$ )

$$N_\infty' = \frac{\sigma N n_1}{\lambda}$$

$$= \frac{100 \times 10^{-24} \times 10^{12} \times 6{\cdot}62 \times 10^{23} \times 19{\cdot}3 \times 0{\cdot}02}{197} \times \frac{2{\cdot}7 \times 24 \times 3600}{0{\cdot}693}$$

$$= 4{\cdot}4 \times 10^{16}$$

সুতরাং উৎপন্ন $Au^{198}$ আইসোটোপের পরিমাণ হবে

$$M(Au^{198}) = \frac{4{\cdot}4 \times 10^{16}}{6{\cdot}62 \times 10^{23}} \times 198 = 13 \text{ মাইক্রোগ্রাম}$$

বেশীর ভাগ কৃত্রিম তেজস্ক্রিয় পদার্থের উৎপাদনের পরিমাণ খুবই সামান্য হয়; এক গ্রামের অতি ক্ষুদ্র অংশ মাত্র। এদের উৎপাদন (Yield) সাধারণতঃ এদের তেজস্ক্রিয়তার দ্বারা নির্দেশিত হয়। উপরে প্রদত্ত উদাহরণে উৎপাদন সম্পৃক্ত হবার পরে $Au^{198}$ কেন্দ্রকের বিঘটন হার হবে

$$\lambda N_\infty' = \sigma N n_1$$

$$= \frac{0{\cdot}693}{2{\cdot}7 \times 24 \times 3600} \times 4{\cdot}4 \times 10^{16}$$

$$= 1{\cdot}34 \times 10^{11} \text{ বিঘটন/সেকেণ্ডে}$$

এই বিঘটন হার সহজেই পরিমাপ করা যায়। বস্তুতঃ এর থেকে অনেক নিম্ন মানের তেজস্ক্রিয়তাও সহজেই বিভিন্ন বিকিরণ নির্দেশক যন্ত্রের সাহায্যে পরিমাপ করা যায়।

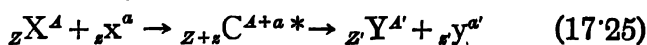
উৎপন্ন কেন্দ্রকের অর্ধজীবনকাল দীর্ঘ হলে উৎপাদনের পরিমাণ অনেক বেশী হয়। কেন্দ্রকীয় বিক্রিয়কের (Nuclear Reactor) মধ্যে $Pu^{239}$ আইসোটোপ ( $\tau = 2{\cdot}44 \times 10^4$ বৎসর ) কিলোগ্রাম মাত্রায় বা আরও অধিক পরিমাণে উৎপন্ন হয়।

## 17·19 : বোরের যৌগ-কেন্দ্রক তত্ত্ব

(17·2) অনুচ্ছেদে আমরা দেখেছি যে ব্ল্যাকেট কর্তৃক অনুষ্ঠিত মেঘ-কক্ষ পরীক্ষার ফলাফল থেকে বোঝা যায় যে $N^{14}$ কেন্দ্রকের মধ্যে $\alpha$-কণিকা প্রবেশ করলে কণিকাটির নিজস্ব সত্ত্বা সম্পূর্ণ বিলুপ্ত হয়ে যায় এবং একটি খুব ক্ষণস্থায়ী কেন্দ্রক $F^{18*}$ সৃষ্ট হয়। এই কেন্দ্রকটির বিঘটনের ফলেই $O^{17}$ কেন্দ্রক এবং প্রোটন পাওয়া যায়।

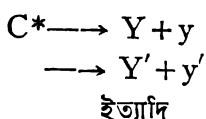
কেন্দ্রক বিক্রিয়া সম্পর্কিত উপরোক্ত তথ্য এবং অনুরূপ নানাবিধ তথ্য বিশ্লেষণ করে বোর (Niels Bohr) ) ১৯৩৬ সালে কেন্দ্রক-বিঘটন সম্পর্কিত যে যৌগ-কেন্দ্রক মতবাদ (Compound Nucleus Hypothesis) উদ্ভাবিত করেন সে সম্বন্ধেও (17·2) অনুচ্ছেদে উল্লেখ করা হয়েছে। বোরের মতে যখন একটি কণিকা x কোন একটি কেন্দ্রক X-এর উপরে আপতিত হয়ে কেন্দ্রক-বিক্রিয়া সংঘটিত করে, তখন প্রথমতঃ x-কণিকাটি X-কেন্দ্রক কর্তৃক শোষিত হয়ে একটি অতি অল্পক্ষণ স্থায়ী যৌগ-কেন্দ্রক (Compound Nucleus) উৎপন্ন করে। এই যৌগ-কেন্দ্রকটি উত্তেজিত অবস্থায়, অর্থাৎ ভৌমস্তর অপেক্ষা উচ্চতর শক্তিস্তরে সৃষ্ট হয়। এর স্থায়িত্ব সাধারণতঃ $10^{-16}$ সেকেণ্ডের মত হয়। এখানে উল্লেখযোগ্য যে যৌগ-কেন্দ্রকের জীবনকাল যদিও খুব কম হয়, একটি উচ্চশক্তি কেন্দ্রকীয় কণিকা কর্তৃক বিনা বাধায় কোন কেন্দ্রক সম্পর্ণ অতিক্রম করতে যে সময় লাগে তার তুলনায় এর জীবনকাল অনেক দীর্ঘতর হয়। যদি কণিকাটির বেগ $10^8$ বা $10^9$ সেমি/সেকেণ্ড হয়, তাহলে এই শেষোক্ত সময়ের মান হয় প্রায় $10^{-21}$ বা $10^{-22}$ সেকেণ্ডের মত। অর্থাৎ আপতিত কণিকা কর্তৃক কেন্দ্রকটিকে সোজাসুজি অতিক্রম করার জন্য প্রয়োজনীয় সময়ের তুলনায় যৌগ-কেন্দ্রকটি অনেক দীর্ঘতর সময় স্থায়ী হয়।

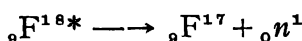
যৌগ-কেন্দ্রক সৃষ্টির প্রায় $10^{-16}$ সেকেণ্ড পরে সেটি বিঘটিত হয়ে একটি কণিকা y নিঃসৃত করে এবং অবশিষ্ট কেন্দ্রক Y পড়ে থাকে। বোরের যৌগ-কেন্দ্রক মতবাদ অনুসারে আমরা লিখতে পারি

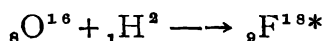
$$_ZX^A + {_z}x^a \rightarrow {_{Z+z}}C^{A+a\,*} \rightarrow {_{Z'}}Y^{A'} + {_{z'}}y^{a'} \qquad (17{\cdot}25)$$

(17·25) সমীকরণে C হচ্ছে যৌগ-কেন্দ্রক, যার ভর-সংখ্যা হচ্ছে $(A+a)$ এবং পরমাণবিক সংখ্যা হচ্ছে $(Z+z)$। যেহেতু C কেন্দ্রকটি উত্তেজিত অবস্থায় সৃষ্ট হয় সেইজন্য এটিকে একটি তারকা চিহ্ন দ্বারা (*) নির্দেশিত করা হয়। $C^*$ কেন্দ্রকটি প্রায় $10^{-16}$ সেকেণ্ড পরে বিঘটিত হয়ে Y এবং y কেন্দ্রক দুটি উৎপন্ন করে।

বোরের মতবাদ অনুযায়ী যৌগ-কেন্দ্রক $C^*$ বিভিন্ন ধরনে বিঘটিত হতে পারে। কোন কোন ক্ষেত্রে $C^*$ বিঘটিত হয়ে y কণিকা নিঃসৃত করে এবং Y কেন্দ্রক উৎপন্ন হয়; আবার কোন কোন ক্ষেত্রে বিঘটনের ফলে অন্য কোন প্রকার কেন্দ্রকীয় কণিকা $y'$ নিঃসৃত হয় এবং $Y'$ অবশিষ্ট কেন্দ্রক উৎপন্ন হয়। এছাড়া আরও অন্য ভাবে বিঘটন হতে পারে। আমরা লিখতে পারি

$$C^* \longrightarrow Y+y$$
$$\longrightarrow Y'+y'$$

ইত্যাদি

উদাহরণস্বরূপ $N^{14}$ কর্তৃক α-কণিকা শোষণের ফলে উৎপন্ন $F^{18*}$ যৌগ-কেন্দ্রক প্রোটন নিঃসৃত করে বিঘটিত না হয়ে কোন কোন ক্ষেত্রে একটি নিউট্রন নিঃসৃত করতে পারে, যার ফলে $F^{17}$ অবশিষ্ট কেন্দ্রক উৎপন্ন হয়ঃ

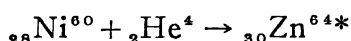
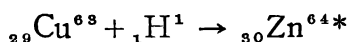
$${}_9F^{18*} \longrightarrow {}_9F^{17} + {}_0n^1$$

বোর আরও কল্পনা করেন যৌগ-কেন্দ্রক কী ভাবে সৃষ্ট হয় তার উপরে এর বিঘটনের সম্ভাব্যতা নির্ভর করে না। উপরে প্রদত্ত উদাহরণে $F^{18*}$ যৌগ-কেন্দ্রকটি শুধু যে $N^{14}$ কর্তৃক α-কণিকা শোষণের ফলে উৎপন্ন হতে পারে তাই নয়, একটি $O^{16}$ কেন্দ্রক কর্তৃক ডয়টেরন $(H^2)$ শোষণের ফলেও একই যৌগ-কেন্দ্রক উৎপন্ন হয়ঃ

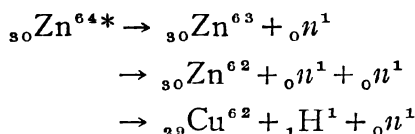
$${}_8O^{16} + {}_1H^2 \longrightarrow {}_9F^{18*}$$

$F^{18*}$ যৌগ-কেন্দ্রকটি প্রথমোক্ত পদ্ধতিতে যে শক্তিস্তরে সৃষ্ট হয়, আপতিত ডয়টেরনের গতিশক্তি নিয়ন্ত্রিত করে দ্বিতীয় ক্ষেত্রেও সেটিকে ঠিক সেই একই শক্তিস্তরে উৎপন্ন করা সম্ভবপর। বোরের উপরোক্ত মতবাদ অনুযায়ী দুই বিভিন্ন পদ্ধতিতে একই শক্তিস্তরে উৎপন্ন $F^{18*}$ যৌগ-কেন্দ্রকের নির্দিষ্ট কোন ভাবে বিঘটনের সম্ভাব্যতা সমান হয়। অর্থাৎ দুই ক্ষেত্রেই $F^{18*}$ যৌগ-কেন্দ্রকের বিঘটনের ফলে $O^{17}$ এবং প্রোটন উৎপন্ন হবার সম্ভাব্যতা (Probability)

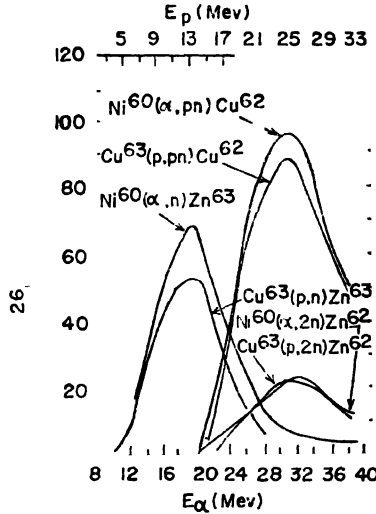
সমান হয়। যৌগ-কেন্দ্রকটি কী পদ্ধতিতে উৎপন্ন হয়, তার উপরে বিঘটনের সম্ভাব্যতা নির্ভর করে না।

১৯৫০ সালে ঘোষাল (S. N. Ghoshal) কর্তৃক অনুষ্ঠিত পরীক্ষার দ্বারা বোরের এই মতবাদের সত্যতা সর্বপ্রথম প্রমাণিত হয়। এই পরীক্ষায় নিম্নলিখিত দুই পদ্ধতিতে $Zn^{64*}$ যৌগ-কেন্দ্রক গঠিত করা হয়ঃ

$$_{29}Cu^{63} + {}_{1}H^{1} \rightarrow {}_{30}Zn^{64*}$$

$$_{28}Ni^{60} + {}_{2}He^{4} \rightarrow {}_{30}Zn^{64*}$$

একই শক্তিস্তরে গঠিত $Zn^{64*}$ যৌগ-কেন্দ্রক পরমুহূর্তে নিম্নলিখিত বিভিন্ন পদ্ধতিতে বিঘটিত হয়ঃ

$$\begin{aligned} _{30}Zn^{64*} &\rightarrow {}_{30}Zn^{63} + {}_{0}n^{1} \\ &\rightarrow {}_{30}Zn^{62} + {}_{0}n^{1} + {}_{0}n^{1} \\ &\rightarrow {}_{29}Cu^{62} + {}_{1}H^{1} + {}_{0}n^{1} \end{aligned}$$

প্রথম ক্ষেত্রে $Zn^{64*}$ একটি নিউট্রন নিঃসৃত করে $Zn^{63}$ তেজস্ক্রিয় কেন্দ্রক উৎপন্ন করে। দ্বিতীয় ক্ষেত্রে দুটি নিউট্রন নিঃসৃত হয় এবং $Zn^{62}$ তেজস্ক্রিয় কেন্দ্রক উৎপন্ন হয় ; তৃতীয় ক্ষেত্রে একটি প্রোটন ও একটি নিউট্রন নিঃসৃত হয় ও $Cu^{62}$ তেজস্ক্রিয় কেন্দ্রক সৃষ্ট হয়। বিভিন্ন ক্ষেত্রে উৎপন্ন পদার্থের তেজস্ক্রিয়তা পরিমাপ করে কতগুলি তেজস্ক্রিয় কেন্দ্রক সৃষ্ট হয় তা নিরূপণ করা যায় এবং তার থেকে প্রত্যেক ক্ষেত্রে কেন্দ্রক-বিক্রিয়ার প্রস্থচ্ছেদ (Cross Section) নির্ণয় করা হয় (17·17 অনুচ্ছেদ দ্রষ্টব্য)। যৌগ-কেন্দ্রক সৃষ্টিকারী আপতিত কণিকার ( $H^1$ বা $He^4$ ) শক্তি পরিবর্তনের সংগে উক্ত প্রস্থচ্ছেদগুলির পরিবর্তনের লেখচিত্র ( 17·12 ) চিত্রে প্রদর্শিত হয়েছে। এই চিত্র থেকে দেখা যায় যে $Cu^{63}$ $(p, n)$ $Zn^{63}$ এবং $Ni^{60}$ $(\alpha, n)$ $Zn^{63}$ উভয় বিক্রিয়ার প্রস্থচ্ছেদের ( অর্থাৎ সম্ভাব্যতার ) লেখচিত্র দুটিকে পরস্পরের উপরে প্রায় সম্পূর্ণভাবে সমাপতিত (Coincident) করা যায়, যদি আপতিত $\alpha$-কণিকার গতিশক্তি নির্দেশক অক্ষ ($E_\alpha$) প্রোটনের গতিশক্তি নির্দেশক অক্ষের ($E_p$) সাপেক্ষে 7 মি-ই-ভো অপসৃত করা হয়। এইরূপ অপসৃত করার কারণ হচ্ছে যে প্রোটনের গতিশক্তি অপেক্ষা $\alpha$-কণিকার গতিশক্তি 7 মি-ই-ভো বেশী হলেই তবে যৌগ-কেন্দ্রক $Zn^{64*}$ দুই ক্ষেত্রে একই শক্তিস্তরে উৎপন্ন হয়।

অনুরূপে $Cu^{63}$ $(p,\ 2n)$ $Zn^{62}$ ও $Ni^{60}$ $(\alpha,\ 2n)$ $Zn^{62}$ বিক্রিয়া প্রস্থচ্ছেদের লেখচিত্র দুটি এবং $Cu^{63}$ $(p,\ pn)$ $Cu^{62}$ ও $Ni^{60}$ $(\alpha,\ pn)$ $Cu^{62}$ বিক্রিয়া প্রস্থচ্ছেদের লেখচিত্র দুটিকেও পরস্পরের উপরে সমাপতিত (Coincident) করান সম্ভবপর।

চিত্র 17·12

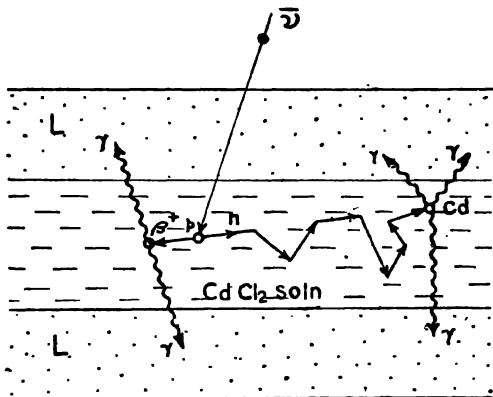
বোরের যৌগ-কেন্দ্রক মতবাদের সত্যতা যাচাই করার পরীক্ষালব্ধ ফল।

উপরে আলোচিত পরীক্ষার ফলাফল থেকে বোরের যৌগ-কেন্দ্রক মতবাদের সত্যতা দৃঢ়ভাবে প্রতিষ্ঠিত হয়।

এখানে উল্লেখযোগ্য যে যদিও বহুবিধ কেন্দ্রক বিক্রিয়া যৌগ-কেন্দ্রক গঠনের মাধ্যমে সংঘটিত হয়, অনেক ক্ষেত্রে অন্যরূপ প্রক্রিয়ায় কেন্দ্রক-বিক্রিয়া সংঘটিত হতে দেখা যায়। আপতিত কণিকার শক্তি খুব উচ্চ হলে ($E > 100$ মি-ই-ভো), যৌগ-কেন্দ্রক গঠিত না হয়ে কেন্দ্রকটি আপতিত কণিকার আঘাতে বহুখণ্ডে বিভক্ত হয়ে যায়। এইরূপ বিক্রিয়াকে 'বিখণ্ডন বিক্রিয়া' (Spallation Reaction) বলা যায়। আবার কোন কোন ক্ষেত্রে আপতিত কণিকা কেন্দ্রকের মধ্যে প্রবেশ করে কেন্দ্রক-মধ্যস্থ কোন কণিকার সংগে সোজাসুজি সংঘাতের ফলে সেটিকে নিঃসৃত করে এবং নিজেও নির্গত হয়ে আসে (Direct Reaction)। এইসব বিভিন্ন প্রকার বিক্রিয়া পদ্ধতির আলোচনা বর্তমান গ্রন্থের বিষয় বহির্ভূত।

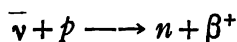
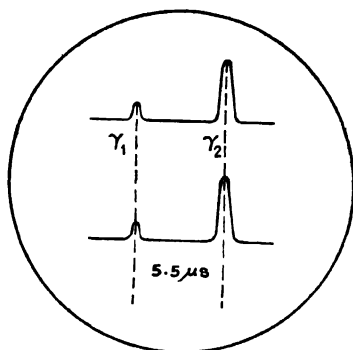
## 17·20 : নিউট্রিনো আবিষ্কার

(13·7) অনুচ্ছেদে পাউলির নিউট্রিনো মতবাদের কথা আলোচনা করা হয়েছে। তেজস্ক্রিয় পদার্থ নিঃসৃত $\beta$-কণিকার নিরবচ্ছিন্ন শক্তি বণ্টন (Continuous Energy Distribution) ব্যাখ্যা করার জন্য নিউট্রিনোর অস্তিত্ব কল্পনা করা প্রয়োজন। এই কাল্পনিক কণিকাটির ভৌত ধর্মাবলী এতই অদ্ভুত যে এর অস্তিত্বের সোজাসুজি প্রমাণ পাওয়া খুব দুরূহ।

রাইন্‌স এবং কাওয়ান (F. Reines and C. L. Cowan. Jr.) নামক দুজন আমেরিকান বিজ্ঞানী ১৯৫৬ সালে সর্বপ্রথম নিউট্রিনোর অস্তিত্বের পরীক্ষামূলক প্রমাণ প্রদর্শন করতে সমর্থ হন। (19·8) অনুচ্ছেদে বর্ণিত কেন্দ্রকীয় বিক্রিয়কের (Nuclear Reactor) মধ্যে যে সব তেজস্ক্রিয় বিভাজন-খণ্ড (Fission Fragments) প্রভূত পরিমাণে উৎপন্ন হয় তার থেকে খুব উচ্চ তীব্রতা সম্পন্ন নিউট্রিনো (অথবা বিপরীত-নিউট্রিনো) গুচ্ছ (Beam) পাওয়া যায়। একটি বিপরীত-নিউট্রিনো

চিত্র 17·13

নিউট্রিনো আবিষ্কার পরীক্ষা।

(Anti Neutrino) যখন একটি প্রোটনের দ্বারা শোষিত হয়, তখন একটি নিউট্রন এবং একটি পজিট্রন সৃষ্ট হয়। এই বিক্রিয়া নিম্নলিখিত সমীকরণ দ্বারা নির্দেশিত করা যায়ঃ

$$\bar{\nu} + p \longrightarrow n + \beta^+$$

আলোচ্য পরীক্ষা ব্যবস্থা (17·13) চিত্রে প্রদর্শিত হয়েছে। বিক্রিয়ক থেকে প্রাপ্ত বিপরীত-নিউট্রিনোগুচ্ছ জলপূর্ণ একটি বিশাল জলাধারের মধ্যে প্রবেশ করে। জলের মধ্যে কিছু পরিমাণ $CdCl_2$ (ক্যাডমিয়াম ক্লোরাইড) লবণ দ্রবীভূত থাকে। জলাধারের দুই পার্শ্বে আরও দুটি বৃহদায়তন তরলাধার (L) রাখা হয়। এই আধার দুটি তরল চমক-উৎপাদক (Liquid Scintillator) পদার্থ দ্বারা পূর্ণ থাকে এবং এদের অপর প্রান্তে বহু সংখ্যক আলোক-তাড়িত পরিবর্ধক কোষ (Photo Multiplier Cells) বিন্যস্ত থাকে। জলাধারের মধ্যে প্রোটন কর্তৃক বিপরীত-নিউট্রিনো শোষণের ফলে সৃষ্ট পজিট্রন জলের মধ্যে পরিভ্রমণ কালে ইলেকট্রনের সংগে বিক্রিয়া করে বিনষ্ট হয়, যার ফলে দুটি বিপরীতমুখী 0·51 মি-ই-ভো শক্তি সম্পন্ন বিনাশ-জনিত (Annihilation) $\gamma$-রশ্মি ফোটন নিঃসৃত হয়। এই ফোটন দুটি তরল চমক-উৎপাদকদ্বয়ের মধ্যে প্রবেশ করার ফলে যে দীপ্তির চমক উৎপন্ন হয় তার প্রভাবে আলোক-তাড়িত পরিবর্ধকের মধ্যে একটি তড়িৎ ঝলক (Pulse) সৃষ্ট হয়, যা পরিবর্ধিতাকারে একটি কম্পন-বীক্ষণ (Oscilloscope) যন্ত্রের দ্বারা নির্দেশিত হয় (17.14 চিত্র দ্রষ্টব্য)। আলোচ্য

চিত্র 17·14

নিউট্রিনো আবিষ্কার পরীক্ষায় কম্পন-বীক্ষণে প্রাপ্ত চিত্রের নিদর্শন। $\gamma_1$ হচ্ছে পজিট্রন বিনাশ-জনিত $\gamma$-রশ্মির দ্বারা উৎপন্ন তড়িৎ-ঝলক। $\gamma_2$ হচ্ছে ক্যাডমিয়াম কেন্দ্রক দ্বারা নিউট্রন শোষণের ফলে উৎপন্ন $\gamma$-রশ্মির দ্বারা উৎপন্ন তড়িৎ-ঝলক।

বিক্রিয়ার ফলে উৎপন্ন নিউট্রনটি জলের মধ্যেকার প্রোটনগুলির সংগে পুনঃপুনঃ সংঘাতের দ্বারা শক্তিক্ষয় করে অবশেষে ক্যাডমিয়াম কেন্দ্রক কর্তৃক

$(n, \gamma)$ পদ্ধতিতে শোষিত হয়। এর ফলে কয়েকটি $\gamma$-ফোটন নিঃসৃত হয়, যাদের মোট শক্তি প্রায় 9 মি-ই-ভো হয়। এই $\gamma$-ফোটনগুলিও তরল চমক-উৎপাদকের মধ্যে শোষিত হয়ে যে চমক উৎপন্ন করে তার থেকে একটি তড়িৎ-ঝলক সৃষ্ট হয়। এটিও পূর্বের মত পরিবর্ধিতাকারে কম্পন-বীক্ষণ যন্ত্রের পর্দার উপরে নির্দেশিত হয়। দুটি তড়িৎ-ঝলকের মধ্যে প্রায় 5.5 মাইক্রো-সেকেণ্ড সময়ের ব্যবধান থাকে। বিশেষ ধরনের ইলেকট্রনিক পদ্ধতিতে এইরূপ যুগ্ম তড়িৎ-ঝলক উৎপাদনের হার গণনা করা যায়।

রাইন্স এবং কাওয়ান তাঁদের পরীক্ষায় প্রতি ঘণ্টায় প্রায় 2·88 এইরূপ যুগ্ম তড়িৎ-ঝলক উৎপন্ন হতে দেখেন। এই সংখ্যা প্রোটন কর্তৃক বিপরীত-নিউট্রিনো শোষণের সম্ভাব্যতার সংগে সংগতিপূর্ণ। এখানে উল্লেখযোগ্য যে এই সম্ভাব্যতা খুবই কম, কারণ নিউট্রিনো কণিকাটির কোন আধান বা ভর নাই। বস্তুতঃ প্রোটন কর্তৃক বিপরীত-নিউট্রিনো শোষণের প্রস্থচ্ছেদের মান মাত্র $6 \times 10^{-20}$ বার্ন হয় বলে অনুমান করা হয়।

### 17·21 : কেন্দ্রকীয় আইসোমারিত্ব

কোন কোন প্রাকৃতিক অথবা কৃত্রিম তেজস্ক্রিয় আইসোটোপের ক্ষেত্রে একাধিক অর্ধজীবনকাল সহকারে বিঘটনের নিদর্শন পাওয়া যায়। ইউরেনিয়াম-রেডিয়াম শ্রেণীর অন্তর্গত $UX_1$ $(Th^{234})$ মৌলের নিম্নলিখিত বিঘটনের কথা (11·7) অনুচ্ছেদে উল্লেখ করা হয়েছে ঃ

$$UX_1 \xrightarrow[24\cdot1 \text{ দিন}]{\beta^-} UX_2 \xrightarrow[1\cdot18 \text{ মি}]{\beta^-} UII$$

অল্প সংখ্যক (0·35%) $UX_1$ পরমাণুর ক্ষেত্রে কিন্তু অন্য এক প্রকার তেজস্ক্রিয়তা লক্ষিত হয়। এই তেজস্ক্রিয়তাকে নিম্নলিখিত ভাবে নির্দেশিত করা যায় ঃ

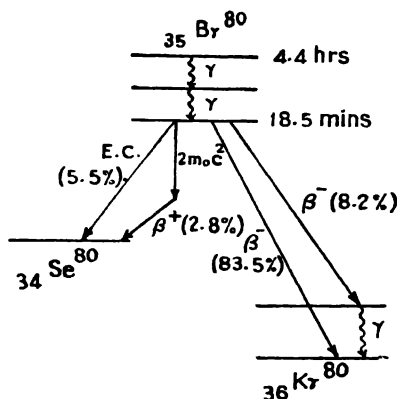
$$UX_1 \xrightarrow[24\cdot1 \text{ দিন}]{\beta^-} UZ \xrightarrow[6\cdot7 \text{ ঘণ্টা}]{\beta^-} UII$$

অর্থাৎ দ্বিতীয় ক্ষেত্রে $UX_1$ এর বিঘটনের ফলে সৃষ্ট UZ পরমাণুগুলির তেজস্ক্রিয়তার অর্ধজীবনকাল প্রথম ক্ষেত্রে সৃষ্ট $UX_2$ এর অর্ধজীবনকাল অপেক্ষা ভিন্ন হয়। যেহেতু $UX_2$ এবং UZ, দুটি মৌলই $UX_1$ থেকে

$\beta^-$ বিঘটনের ফলে সৃষ্ট হয়, অতএব এই দুটিই হচ্ছে প্রকৃতপক্ষে প্রোটো-অ্যাক্টিনিয়াম ($Z=91$) মৌলের একই ভর-সংখ্যা ($A=234$) সম্পন্ন $Pa^{234}$ আইসোটোপ। এদের অর্ধজীবনকাল ভিন্ন হয়। কিন্তু উভয়েই $\beta^-$ বিঘটনের দ্বারা UII মৌলে রূপান্তরিত হয়। অর্থাৎ এক্ষেত্রে একই মৌলের একই আইসোটোপ বিভিন্ন অর্ধজীবনকাল সহকারে বিঘটিত হয়। এইরূপ দুটি ভিন্ন অর্ধজীবনকাল সম্পন্ন সমপ্রকার আইসোটোপকে বলা হয় 'কেন্দ্রকীয় আইসোমার' ( Nuclear Isomer ) এবং এইরূপ সংঘটনকে বলা হয় 'আইসোমারিত্ব' (Isomerism)।

আইসোমারের উৎপত্তির কারণ হচ্ছে যে কোন কোন ক্ষেত্রে একই আইসোটোপ দুই বিভিন্ন শক্তিস্তরে সৃষ্ট হতে পারে। সাধারণতঃ উত্তেজিত শক্তিস্তরে সৃষ্ট কেন্দ্রকগুলি $10^{-13}$ সেকেণ্ড অপেক্ষা কম সময়ের মধ্যে $\gamma$-ফোটন নিঃসৃত করে নিম্নতর স্তরে সংক্রমিত হয়। কিন্তু কোন কোন ক্ষেত্রে উত্তেজিত শক্তিস্তরের অর্ধজীবনকাল $10^{-9}$ সেকেণ্ড থেকে কয়েক মাস পর্যন্ত দীর্ঘ হতে পারে। এইরূপ স্তরকে 'দীর্ঘস্থায়ী স্তর' ( Metastable Level) বলা যায়। এইরূপ দীর্ঘস্থায়ী পরমাণবিক শক্তিস্তরের কথা অনুপ্রভ বিকিরণ নিঃসরণ প্রসঙ্গে (3·16) অনুচ্ছেদে উল্লিখিত হয়েছে। সাধারণতঃ দুটি স্তরের কৌণিক ভরবেগের পার্থক্য বেশী হলে তাদের মধ্যেকার সংক্রমণ নিষিদ্ধ (Forbidden) হয়। এইসব ক্ষেত্রে উত্তেজিত স্তর অপেক্ষাকৃত দীর্ঘস্থায়ী হয়। কোন কেন্দ্রক যখন এইরূপ দীর্ঘস্থায়ী স্তরে সৃষ্ট হয়, তখন সেটি অপেক্ষাকৃত দীর্ঘ সময় পরে এবং নির্দিষ্ট অর্ধজীবনকাল সহকারে নিম্নতর স্তরে সংক্রমিত হয়। যদি কেন্দ্রকটি $\beta$-বিঘটনশীল হয়, তাহলে পরবর্তীকালে সেটি ভৌমস্তর থেকে ভিন্ন অর্ধজীবনকাল সহকারে $\beta$-বিঘটন করে অপর একটি কেন্দ্রকে রূপান্তরিত হয়। অর্থাৎ একই আইসোটোপের দুই প্রকার অর্ধজীবনকাল পরিলক্ষিত হয়।

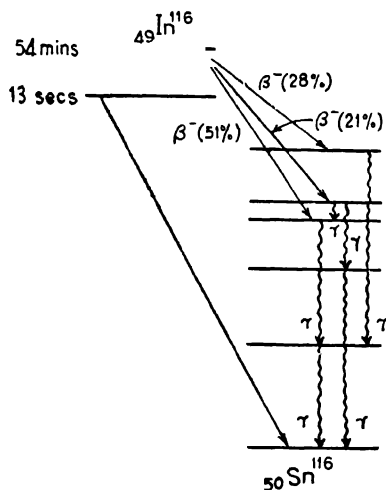
কৃত্রিম উপায়ে সৃষ্ট তেজস্ক্রিয় মৌলসমূহের মধ্যে অনেক ক্ষেত্রে এইরূপ আইসোমার উৎপন্ন হতে দেখা যায়। উদাহরণস্বরূপ ব্রোমিনের ($Z=35$) অন্যতম স্থায়ী আইসোটোপ $Br^{79}$ মন্থরগতি নিউট্রন শোষণের ফলে তেজস্ক্রিয় $Br^{80}$ আইসোটোপে রূপান্তরিত হয়। এই আইসোটোপটি দুই বিভিন্ন অর্ধ-জীবনকাল সহকারে বিঘটিত হতে দেখা যায়। নিউট্রন বর্ষণের ফলে $Br^{80}$ একটি উত্তেজিত দীর্ঘস্থায়ী ( বা আইসোমারীয় ) শক্তি অবস্থায় সৃষ্ট হয়। এইরূপ আইসোমারীয় অবস্থায় সৃষ্ট আইসোটোপটিকে $Br^{80m}$

চিহ্ন দ্বারা নির্দেশিত করা হয়। $Br^{80m}$ আইসোমারীয় অবস্থাটি (State) 4·4 ঘণ্টা অর্ধজীবনকাল সহকারে পরপর দুটি γ-ফোটন নিঃসৃত করে $Br^{80}$ ভৌম অবস্থায় সংক্রমিত হয়। $Br^{80}$ এই ভৌম অবস্থা

চিত্র 17·15

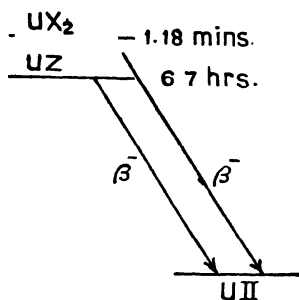
$Br^{80}$ আইসোমারের শক্তিস্তর চিত্র।

থেকে 18 মিনিট অর্ধজীবনকাল সহকারে $\beta^-$ বিঘটন করে $Kr^{80}$ আইসোটোপে রূপান্তরিত হয়। (17·15) চিত্রে $Br^{80}$ আইসোটোপের এই দুই প্রকার বিঘটনের শক্তিস্তর চিত্র দেখান হয়েছে। এখানে উল্লেখযোগ্য অপেক্ষাকৃত অল্প সংখ্যক $Br^{80}$ পরমাণুর ক্ষেত্রে $\beta^-$ বিঘটনের পরিবর্তে $\beta^+$ বিঘটন বা কক্ষীয় ইলেকট্রন আহরণ (Orbital Electron Capture) জাতীয় বিঘটনও পরিলক্ষিত হয়। এক্ষেত্রে সৃষ্ট আইসোটোপটি $Se^{80}$ হয়।

যখন দুটি আইসোমারের মধ্যে একটি অপরটি থেকে γ-সংক্রমণের ফলে সৃষ্ট হয়, তখন সে দুটিকে 'জন্মগতভাবে সম্পর্কিত' (Genetically Related) আইসোমার বলা হয়। উপরে আলোচিত $Br^{80}$ সহ বেশীর ভাগ আইসোমার এই শ্রেণীর মধ্যে পড়ে। অল্প কিছু ক্ষেত্রে আইসোমার দুটির মধ্যে এইরূপ জন্মগত সম্পর্ক থাকে না। যথা $In^{116}$ $(Z=49)$ আইসোটোপের দুটি আইসোমারের মধ্যে উচ্চতর আইসোমারীয় শক্তি অবস্থাটি 54 মিনিট অর্ধজীবনকাল সহকারে $\beta^-$ বিঘটন করে $Sn^{116}(Z=50)$ আইসোটোপের উত্তেজিত শক্তি-অবস্থা সমূহে সংক্রমিত হয়। অপরপক্ষে

$In^{116}$ ভৌম অবস্থা থেকে 13 সেকেণ্ড অর্ধজীবনকাল সহকারে $\beta^-$ বিঘটন করে $Sn^{116}$ আইসোটোপের ভৌম অবস্থায় সংক্রমিত হয়। উল্লেখযোগ্য যে $In^{116}$ এর এই দুটি আইসোমারীয় শক্তিস্তরের মধ্যে কোন $\gamma$-সংক্রমণ দেখা

চিত্র 17·16

$In^{116}$ আইসোমারের শক্তিস্তর চিত্র।

যায় না। (17·16) চিত্রে $In^{116}$ এর আইসোমারীয় স্তরগুলির সংক্রমণ প্রদর্শিত হয়েছে।

চিত্র 17·17

$UX_2$ আইসোমারের শক্তিস্তর চিত্র। $UX_2$ থেকে UZ স্তরে 0·15% ক্ষেত্রে আইসোমারীয় সংক্রমণ ঘটে, যা চিত্রে দেখান হয় নি।

উপরে আলোচিত $UX_2$ এবং UZ আইসোমার দুটির ক্ষেত্রে উপরোক্ত দুই ধরনের সংক্রমণই পরিলক্ষিত হয়। (17·17) চিত্রে এই সংক্রমণগুলি দেখান হয়েছে।

### 17·22 : তেজস্ক্রিয়তার ব্যবহারিক প্রয়োগ

ইতিপূর্বে বিভিন্ন তেজস্ক্রিয় আকরিকের বয়স নির্ণয়ের ক্ষেত্রে প্রাকৃতিক তেজস্ক্রিয়তার ব্যবহার সম্বন্ধে আলোচনা করা হয়েছে (11·11 অনুচ্ছেদ দ্রষ্টব্য)। তাছাড়া তেজস্ক্রিয় $C^{14}$ আইসোটোপের সাহায্যে প্রত্নতাত্ত্বিক নিদর্শন বস্তুর বয়স নির্ণয়ের কথা (17·14) অনুচ্ছেদে উল্লেখ করা হয়েছে।

বিভিন্ন প্রকার তেজস্ক্রিয় পদার্থের ব্যবহারিক প্রয়োগ বর্তমানে সমধিক প্রচলিত। এদের মধ্যে তেজস্ক্রিয় নির্দেশক ( Radioactive Tracer ) পদ্ধতি বিশেষ ভাবে উল্লেখযোগ্য।

আমরা জানি যে কোন মৌলের বিভিন্ন আইসোটোপের রাসায়নিক ধর্মাবলী প্রায় অভিন্ন। সুতরাং কোন মৌলের স্থায়ী আইসোটোপের সংগে যদি অল্প পরিমাণ তেজস্ক্রিয় আইসোটোপ মিশ্রিত করে মৌলটিকে বিভিন্ন প্রকার রাসায়নিক বিক্রিয়ায় অংশ গ্রহণ করতে দেওয়া হয়, তাহলে দুই প্রকার আইসোটোপের পরমাণুগুলি একই ধরনের রাসায়নিক বিক্রিয়া অনুষ্ঠিত করতে থাকে। তেজস্ক্রিয় আইসোটোপ থেকে নিঃসৃত বিকিরণ সহজেই নির্দেশিত হতে পারে। ফলে এই আইসোটোপের পরমাণুগুলি কখন কোথায় যায় তা গাইগার-মূলার সংখ্যায়ক বা অনুরূপ যন্ত্রের সাহায্যে নির্ণয় করে বিক্রিয়ার সময় উক্ত মৌলের পরমাণুগুলি কখন, কোথায় এবং কী ভাবে বিচরণ করে সে সম্বন্ধে খুঁটিনাটি সব রকম তথ্য পাওয়া যেতে পারে। বিভিন্ন প্রকার ভৌত ক্রিয়ার (Physical Process) ক্ষেত্রেও তেজস্ক্রিয় নির্দেশক পদ্ধতি প্রয়োগ করা যেতে পারে। উদাহরণস্বরূপ সীসার মধ্যে পরমাণুসমূহের ব্যাপন (Diffusion) পর্যবেক্ষণ করার জন্য এক টুকরা সাধারণ সীসা এবং তেজস্ক্রিয় আইসোটোপ $Pb^{210}$ (RaD) মিশ্রিত আর এক টুকরা সীসা একটি কাঁচ নলের মধ্যে পরস্পরের সান্নিধ্যে রেখে উত্তপ্ত করে বিগলিত করা হয়। এই অবস্থায় এদের নির্দিষ্ট সময় ধরে ফেলে রাখা হয়। ঘনীভূত (Solidify) করার পর যে অংশে পূর্বে সাধারণ সীসা ছিল সেটিকে পাতলা পাতলা খণ্ডে কেটে বিকিরণ নির্দেশক সংখ্যায়কের সামনে স্থাপিত করলে, তাদের মধ্য থেকে $Pb^{210}$ আইসোটোপের বিশেষত্ব সূচক তেজস্ক্রিয় বিকিরণ

চিত্র 17 18

অটোরেডিওগ্রাফ ।

নিসৃঃত হতে দেখা যায়। এর থেকে সীসার মধ্যে সীসা পরমাণুগুলির ব্যাপন হার পরিমাপ করা যায়। স্পষ্টতঃ তেজস্ক্রিয় আইসোটোপের ব্যবহার ছাড়া এইরূপ পরিমাপ সম্ভব নয়।

চিকিৎসা-বিজ্ঞানে এবং জীববিদ্যার ক্ষেত্রে তেজস্ক্রিয় নির্দেশক পদ্ধতির প্রয়োগ বিশেষ সুবিধাজনক। সজীব পদার্থের অভ্যন্তরে বিভিন্ন জৈব উপাদানের উৎপাদন পদ্ধতি, এইসব উপাদানের পরিভ্রমণ পথ ইত্যাদি এই পদ্ধতিতে সহজেই নির্ণয় করা যায়। উদাহরণস্বরূপ $C^{14}$ আইসোটোপ ব্যবহার করে সালোক-সংশ্লেষ (Photo Synthesis) কালে কার্বন পরমাণুগুলি বিভিন্ন সময়ে কোথায় অবস্থিত থাকে তা নির্ণয় করা সম্ভব। প্রোটিন, নিউক্লিয়িক অ্যাসিড প্রভৃতির সংশ্লেষ (Synthesis) পদ্ধতির স্বরূপ নির্ণয়ের জন্যও $C^{14}$ আইসোটোপের ব্যবহার বর্তমানে সমধিক প্রচলিত।

অনেক সময় গাইগার-মূলার সংখ্যায়ক বা অনুরূপ যন্ত্র ব্যবহারের পরিবর্তে ফোটোগ্রাফিক পদ্ধতিতে তেজস্ক্রিয় বিকিরণ নির্দেশ করা হয়। চারা গাছের দেহের মধ্যে বিভিন্ন পদার্থ কী ভাবে সঞ্চারিত হয়, তা পর্যবেক্ষণের জন্য উক্ত পদার্থের সংগে অল্প পরিমাণে তেজস্ক্রিয় আইসোটোপ মিশ্রিত করে এই পদার্থের দ্রবণের মধ্যে চারাটির শিকড় ডুবিয়ে রাখা যেতে পারে। নির্দিষ্ট সময় পরে চারাটিকে সরিয়ে নিয়ে অন্ধকার কক্ষে ফোটোগ্রাফিক প্লেটের উপরে স্থাপিত করে রাখা হয়। যে সব অংশে পদার্থটি সঞ্চিত হয়েছে সেই সব স্থান থেকে নিঃসৃত বিকিরণ প্লেটটির উপরে আপতিত হয়। নির্দিষ্ট সময় পরে প্লেটটি বিকসিত করলে, এই সব অংশ সহজেই নির্দেশিত হয়। এই পদ্ধতিকে অটো-রেডিয়োগ্রাফ (Auto Radiograph) পদ্ধতি বলা হয়। (17·18) চিত্রে একটি অটো-রেডিয়োগ্রাফ প্রদর্শিত হয়েছে।

রেডিয়াম, $Co^{60}$ প্রভৃতি তেজস্ক্রিয় আইসোটোপ নিঃসৃত $\gamma$-রশ্মি ক্যানসার ইত্যাদি দুরারোগ্য ব্যাধি নিরাময়ের কাজে বহুল পরিমাণে ব্যবহৃত হয়। অনেক সময় বিশেষ ধরনের তেজস্ক্রিয় পদার্থ মানব-দেহের কতকগুলি বিশেষ বিশেষ অংশে সঞ্চিত হয়। যদি দেহের এই সব স্থানে ব্যাধিগ্রস্ত জীবকোষ বা তন্তু থাকে, তাহলে সেগুলির উপরে তেজস্ক্রিয় বিকিরণ বর্ষিত হয়, যার ফলে সেগুলি বিনষ্ট হয়। উদাহরণস্বরূপ, থাইরয়েড (Thyroid) নামক গ্রন্থিতে (Gland) আইয়োডিন সঞ্চিত হবার প্রবণতা দেখা যায়। থাইরয়েডের এক প্রকার ব্যাধি হচ্ছে গলগণ্ড (Goitre)। সুতরাং এই

রোগগ্রস্ত ব্যক্তিকে যদি তেজস্ক্রিয় $I^{131}$ আইসোটোপ মিশ্রিত কোন আইয়োডাইড লবণ সেবন করান যায়, তাহলে সাধারণ আইয়োডিনের সংগে তেজস্ক্রিয় $I^{131}$ আইসোটোপও থাইরয়েডে গিয়ে সঞ্চিত হয়। এই আইসোটোপ থেকে নিঃসৃত বিকিরণ বর্ষণের ফলে গলগণ্ড রোগগ্রস্ত কোষসমূহ বিনষ্ট হয়।

আবার লিউকেমিয়া ( এক প্রকার রক্তের ক্যান্‌সার ), মস্তিষ্কের টিউমার প্রভৃতি রোগের চিকিৎসার জন্য $P^{32}$ তেজস্ক্রিয় আইসোটোপ ব্যবহার করা হয়। রক্তের এবং মস্তিষ্কের কোষগুলির মধ্যে ফসফরাস সঞ্চিত হবার প্রবণতা দেখা যায়। ফলে দূষিত কোষগুলির মধ্যে যে $P^{32}$ আইসোটোপ সঞ্চিত হয়, তার থেকে নিঃসৃত $\beta$-কণিকাগুলি সেইসব কোষকে বিনষ্ট করে।

রোগ নিরূপণের (Diagnosis) ক্ষেত্রেও অনেক সময় তেজস্ক্রিয় আইসোটোপ ব্যবহৃত হয়। যথা নানাবিধ রক্তের ব্যাধি নিরূপণের জন্য $P^{32}$ এবং $Cr^{51}$, কিড্‌নীর ব্যাধি নিরূপণের ক্ষেত্রে $Na^{24}$ প্রভৃতির ব্যবহার বর্তমানে বহুল প্রচলিত।

# পরিচ্ছেদ 18

# কণিকা ত্বরণযন্ত্র

## 18·1 : সূচনা

আহিত কেন্দ্রকীয় কণিকার সাহায্যে কেন্দ্রক বিক্রিয়া অনুষ্ঠিত করতে হলে এই সব কণিকাকে উচ্চ শক্তি সম্পন্ন করে তোলা প্রয়োজন। তা না হলে তারা বিকর্ষণী বল কাটিয়ে কেন্দ্রকের মধ্যে প্রবেশ করতে পারে না। যে সব যন্ত্রের সাহায্যে বিভিন্ন প্রকার আহিত কণিকাকে উচ্চ শক্তি সম্পন্ন করে তোলা যায় তাদের কণিকা ত্বরণযন্ত্র (Particle Accelerator) নামে অভিহিত করা যায়। এই সব যন্ত্রের সাহায্যে সাধারণতঃ ইলেকট্রন, প্রোটন, ডয়টেরন, $\alpha$-কণিকা প্রভৃতি আহিত কণিকাগুলিকে উচ্চ শক্তি সম্পন্ন করে তোলা যায়। তাছাড়া বর্তমানে কিছু কিছু হালকা পরমাণুর কেন্দ্রক, যথা লিথিয়াম, বেরিলিয়াম, বোরন, কার্বন, নাইট্রোজেন, অক্সিজেন প্রভৃতিও এই ধরনের যন্ত্রের সাহায্যে উচ্চ শক্তি সম্পন্ন করা হয়।

কণিকা ত্বরণযন্ত্র সমূহকে প্রধানতঃ তিন শ্রেণীতে ভাগ করা যায় ঃ

(ক) প্রথম শ্রেণীর যন্ত্রসমূহে কণিকাগুলি সরলরেখা পথে পরিভ্রমণ করে এক ধাপে সমস্ত শক্তি অর্জন করে। কক্রফ্‌ট-ওয়ালটন বিভব পরিবর্ধক (Voltage Multiplier) যন্ত্র বা ভ্যান্‌-ডে-গ্রাফ্‌ উৎপাদক (Van de Graff Generator) এই শ্রেণীর মধ্যে পড়ে।

(খ) দ্বিতীয় শ্রেণীভুক্ত রৈখিক ত্বরণযন্ত্রের (Linear Accelerator) মধ্যে কণিকাগুলি ধাপে ধাপে শক্তি অর্জন করতে করতে সরলরেখা পথে পরিভ্রমণ করে।

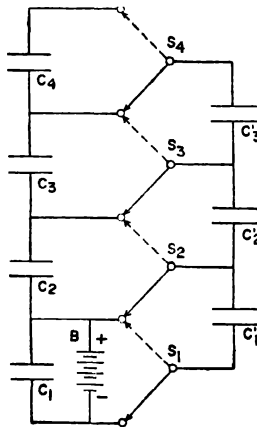
(গ) পরিশেষে চক্রাবর্ত অনুনাদ ত্বরণযন্ত্র (Cyclic Resonance Accelerator) নামক আর এক শ্রেণীর যন্ত্র আছে যার মধ্যে কণিকাগুলি সর্পিল (Spiral) অথবা বৃত্তাকার (Circular) পথে পরিভ্রমণ করে এবং ধাপে ধাপে শক্তি অর্জন করে। সাইক্লোট্রন, বীটাট্রন, সিংক্রোট্রন প্রভৃতি যন্ত্র এই শ্রেণীর অন্তর্গত।

প্রথম শ্রেণীভুক্ত যন্ত্রে খুব উচ্চ বিভব উৎপন্ন করার প্রয়োজন হয়। যদি উৎপন্ন বিভব $V$ ভোল্ট হয়, তাহলে প্রোটন, ডয়টেরন প্রভৃতি এক

ইলেকট্রনীয় আধানবাহী কণিকা এই বিভবের প্রভাবে $V$ ই-ভো পরিমাণ শক্তি অর্জন করে। $\alpha$-কণিকার ক্ষেত্রে অর্জিত শক্তি এর দ্বিগুণ হয়। মিলিয়ন ($10^6$) ইলেকট্রন ভোল্ট শক্তি সম্পন্ন এক একক আধানবাহী কণিকাগুচ্ছ পেতে হলে মিলিয়ন ভোল্ট মাত্রার বিভব উৎপন্ন করার প্রয়োজন। এইরূপ উচ্চ বিভব উৎপাদনের পথে সর্বাপেক্ষা গুরুতর অসুবিধা হচ্ছে অন্তরকের (Insulator) সমস্যা। খুব উচ্চ বিভবের প্রভাবে খুব ভাল অন্তরক পদার্থের অন্তরণ ক্ষমতাও অনেক সময় নষ্ট হয়ে যায়। ফলে আট-দশ মিলিয়ন ইলেকট্রন ভোল্ট অপেক্ষা উচ্চতর শক্তি সম্পন্ন কণিকা এই শ্রেণীর যন্ত্রের সাহায্যে উৎপন্ন করা সম্ভব হয় না।

## 18·2 : কক্রফ্‌ট-ওয়াল্‌টন কণিকা ত্বরণযন্ত্র

কক্রফ্‌ট এবং ওয়াল্‌টন (Cockroft and Walton) একটি আরোহী (Step Up) ট্র্যান্সফর্মার থেকে প্রাপ্ত পরিবর্তী বিভবকে কতকগুলি একমুখী-কারক (Rectifiers) এবং ধারকের (Condensers) সাহায্যে পরিবর্ধিত করে উচ্চ বিভব উৎপন্ন করেন। একমুখীকারকগুলি সুইচের কাজও করে।

(18·1) চিত্রে তাঁদের বিভব পরিবর্ধক যন্ত্রের মৌলিক কার্যপ্রণালী

চিত্র 18·1

কক্রফ্‌ট-ওয়াল্‌টন উৎপাদকের বিভব পরিবর্ধন ক্রিয়াবিধির ব্যাখ্যা।

প্রদর্শিত হয়েছে। $C_1$, $C_2$, $C_3$ প্রভৃতি কতকগুলি সমান ধারকত্ব (Capacity) সম্পন্ন ধারককে (Condensers) শ্রেণীবদ্ধ ভাবে সংযুক্ত করা

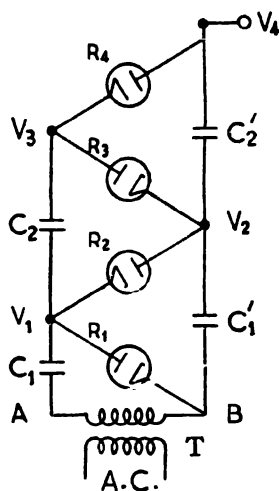
হয়। অনুরূপে $C'_1$, $C'_2$, $C'_3$ প্রভৃতি হচ্ছে অপর কতকগুলি শ্রেণীবদ্ধ ভাবে সংযুক্ত ধারক, যাদের ধারকত্বের মান পূর্বোক্ত ধারকগুলির সমান। প্রকৃত যন্ত্রে ব্যবহৃত একমুখীকারকগুলির পরিবর্তে (18.1) চিত্রে $S_1$, $S_2$, $S_3$ প্রভৃতি কতকগুলি সুইচ প্রদর্শিত হয়েছে। এই সুইচগুলির সাহায্যে ধারক প্লেটগুলিকে ইচ্ছামত দুই দিকে সংযুক্ত করা যায়।

অনুরূপে প্রকৃত যন্ত্রে ব্যবহৃত ট্র্যান্সফর্মারের পরিবর্তে (18·1) চিত্রে $V$ তড়িৎ চালক বল সম্পন্ন একটি ব্যাটারী (B) প্রদর্শিত হয়েছে, যার দুই প্রান্ত $C_1$ ধারকের দুটি প্লেটের সংগে সংযুক্ত করা আছে। মনে করা যাক যে $S_1$, $S_2$, $S_3$ প্রভৃতি সব সুইচগুলির ব্লেড (Blade) প্রথমে নিম্নমুখী অবস্থানে রাখা থাকে। এই অবস্থায় $C_1$ এবং $C'_1$ ধারক দুটি পরস্পরের সমান্তরালে সংযুক্ত হয়। এর ফলে এই ধারক দুটি $V$ বিভবে আহিত হয়। স্পষ্টতঃ সুইচগুলির এই অবস্থানে $C_2$ এবং $C'_2$, $C_3$ এবং $C'_3$ প্রভৃতি দুই দিককার অন্যান্য ধারকগুলিও জোড়ায় জোড়ায় সমান্তরালে সংযুক্ত হয়। এখন যদি সুইচগুলির ব্লেডের অবস্থান পরিবর্তন করে ঊর্ধ্বমুখী করা হয়, তাহলে $C'_1$ ও $C_2$ ধারক দুটি সমান্তরালে সংযুক্ত হয়ে যায়। অনুরূপে $C'_2$, $C_3$ এবং $C'_3$, $C_4$ পরস্পরের সমান্তরালে সংযুক্ত হয়। এর ফলে $C'_1$ ধারকের আধান $C'_1$ এবং $C_2$ ধারক দুটির মধ্যে সমপরিমাণে বণ্টিত হয়; অর্থাৎ এরা উভয়েই $V/2$ বিভবে আহিত হয়। স্পষ্টতঃ এই অবস্থায় $C_1$ ধারকের নিম্ন প্রান্ত এবং $C_2$ ধারকের উপরের প্রান্তের মধ্যে বিভব প্রভেদ $(V+V/2)$ অর্থাৎ $3V/2$ হয়।

এরপরে সুইচগুলির ব্লেড আবার নিম্নাভিমুখী করা হয়। ফলে $C'_1$ আবার $V$ বিভবে আহিত হয়। $C_2$ ধারকের পূর্বে প্রাপ্ত আধান $C_2$ ও $C'_2$ ধারক দুটির মধ্যে বণ্টিত হয়ে যায়, যার ফলে এদের প্রত্যেকটি $V/4$ বিভবে আহিত হয়। এখন সুইচগুলি আবার ঊর্ধ্বমুখী করলে $C'_1$, $C_2$ সমান্তরালে সংযুক্ত হওয়ার ফলে এদের প্রত্যেকে $5V/8$ বিভবে আহিত হয়ে যায়। অপরপক্ষে $C'_2$, $C_3$ সমান্তরালে সংযুক্ত হওয়ার ফলে এদের প্রত্যেকে $V/8$ বিভবে আহিত হয়। অর্থাৎ এখন $C_1$ ধারকের নিম্নপ্রান্ত এবং $C_3$ ধারকের উপরের প্রান্তের মধ্যে $\left(V+\frac{5V}{8}+\frac{V}{8}\right)$ বা $7V/4$ বিভব প্রভেদ উৎপন্ন হয়।

এইভাবে সুইচগুলির পর্যায়ক্রমে বারবার নিম্নমুখী এবং ঊর্ধ্বমুখী সংযোজনের

ফলে B ব্যাটারী থেকে আধান ডানদিকের ধারক শ্রেণীর মাধ্যমে উপরের দিকে স্থানান্তরিত হয়ে ক্রমশঃ বামদিকের $C_1$, $C_2$, $C_3$ প্রভৃতি ধারকগুলিকে উচ্চতর বিভবে আহিত করতে থাকে। অবশেষে সুইচের ব্লেডগুলির অনেকবার এইরূপ অবস্থান পরিবর্তনের ফলে বামদিকের ধারকগুলির প্রত্যেকটি $V$ বিভবে আহিত হয়ে যায়। এই অবস্থায় উৎপন্ন মোট বিভব বামদিকের শ্রেণীবদ্ধ ধারকগুলির বিভবের সমষ্টির সমান হয়।

কক্রফ্ট-ওয়াল্টনের যন্ত্রে প্রকৃতপক্ষে $S_1$, $S_2$, $S_3$ প্রভৃতি সুইচগুলির পরিবর্তে (18·2) চিত্রে প্রদর্শিত কতকগুলি একমুখীকারক (Rectifier) $R_1$, $R_2$, $R_3$ প্রভৃতি ব্যবহার করা হয়। B ব্যাটারীর পরিবর্তে একটি আরোহী ট্র্যান্সফর্মার (T) ব্যবহার করা হয়। ট্র্যান্সফর্মার থেকে প্রায়

চিত্র 18·2

কক্রফ্ট-ওয়াল্টন বিভব উৎপাদকের কার্যপ্রণালী।

100,000 ভোল্ট বিভব পাওয়া যায়। ট্র্যান্সফর্মারের কোন নির্দিষ্ট অর্ধকম্পন কালে (Half Cycle) যখন A প্রান্ত ধনাত্মক হয়, তখন $R_1$ পরিবাহী হয়, যার ফলে $C_1$ ধারক আহিত হয়। পরবর্তী অর্ধকম্পনকালে ট্র্যান্সফর্মারের B প্রান্ত ধনাত্মক হয়, যার ফলে $R_2$ পরিবাহী হয়, $R_1$ অপরিবাহী থাকে। এই অবস্থায় $C'_1$ ধারক $C_1$ ধারকের সমান্তরালে সংযুক্ত হয়ে আহিত হয়।

পরবর্তী অর্ধকম্পনকালে $R_1$ ও $R_3$ একমুখীকারক দুটির মাধ্যমে $C'_1$ ও $C_2$ পরস্পরের সমান্তরালে সংযুক্ত হয়, যার ফলে $C_2$ আহিত হয়। এইভাবে $V_2$ বিন্দুতে ট্র্যান্সফর্মার বিভবের দ্বিগুণ বিভব উৎপন্ন হয়। এইরূপ কয়েকটি বিভব-দ্বিগুণকারী বর্তনীর শ্রেণীবদ্ধ সংযোগের দ্বারা $C'_1$, $C'_2$, $C'_3$ প্রভৃতি শ্রেণীবদ্ধ ধারকগুলির দুই প্রান্তের মধ্যে খুব উচ্চ সমদিষ্ট (D.C.) বিভব প্রভেদ উৎপন্ন হয়।

কক্রফ্‌ট-ওয়াল্‌টনের প্রথম যন্ত্রের সাহায্যে 300,000 ভোল্ট বিভব উৎপন্ন করা হয়। পরে তাঁরা 700,000 ভোল্ট পর্যন্ত বিভব উৎপন্ন করতে সক্ষম হন। পরবর্তী যুগে এইরূপ যন্ত্রের সাহায্যে 3 মিলিয়ন ভোল্ট পর্যন্ত বিভব উৎপন্ন করে কয়েক মাইক্রো-অ্যামপিয়ার পর্যন্ত আয়ন-প্রবাহ পাওয়া যায়।

এইভাবে উৎপন্ন উচ্চ বিভব একটি ত্বরণ-নলের (Accelerator Tube) এক প্রান্তে অবস্থিত আয়ন উৎসের উপরে প্রয়োগ করা হয়। ত্বরণ-নলের অপর প্রান্তে কেন্দ্রক বিক্রিয়া উৎপন্ন করার জন্য প্রয়োজনীয় লক্ষ্যবস্তু ভৌম-বিভবে (Ground Potential) রাখা থাকে। নলের মধ্য দিয়ে পরিভ্রমণ কালে আয়নগুলি উচ্চশক্তি অর্জন করে এবং লক্ষ্যবস্তুর উপরে আপতিত হয়ে কেন্দ্রক বিক্রিয়া সংঘটিত করে।

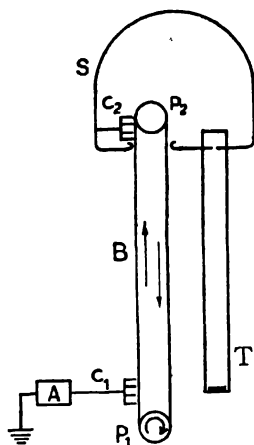
বর্তমান যুগে এই যন্ত্রের উপযোগিতা অনেক হ্রাস পেয়েছে।

## 18·3 : ভ্যান্‌-ডে-গ্রাফ্‌ উৎপাদক

ভ্যান্‌-ডে-গ্রাফ্‌ উৎপাদক (Van de Graff Generator) হচ্ছে একটি স্থির-তড়িৎ যন্ত্র (Electrostatic Machine) যার সাহায্যে কয়েক মিলিয়ন ভোল্ট পর্যন্ত সমদিষ্ট (D.C.) বিভব উৎপন্ন করা যায়।

(18·3) চিত্রে প্রদর্শিত এই যন্ত্রে কোন ভাল অন্তরক (Insulator) পদার্থ ( যথা রেশম, রাবার, বিশেষ ধরনের কাগজ, ইত্যাদি ) দ্বারা নির্মিত একটি নিরবচ্ছিন্ন বেল্টকে (Continuous Belt) দুটি কপিকল (Pulley) এবং একটি মোটরের সাহায্যে ক্রমাগত আবর্তিত করা হয়। একটি কপিকল ($P_1$) ভৌম-বিভবে (Ground Potential) থাকে। অন্যটি ($P_2$) একটি বৃহদায়তন ফাঁপা গোলকের (S) কেন্দ্রস্থলে অবস্থিত থাকে। এই গোলকটি উৎপাদকের উচ্চ বিভব প্রান্ত হিসাবে কাজ করে।

A হচ্ছে একটি সমদিষ্ট বিভব-উৎপাদক যার সাহায্যে উৎপন্ন 50 থেকে 100 কিলো-ভোল্ট পর্যন্ত বিভব কতকগুলি সূচল প্রান্ত সম্পন্ন

($C_1$) পরিবাহী তারের উপরে প্রয়োগ করা হয়। উচ্চ বিভবে আহিত সূচল প্রান্তগুলি থেকে করোণা-মোক্ষণ ( Corona Discharge ) হতে থাকে, যার ফলে ধারা বর্ষণের মত B বেল্টের উপরে আধান বর্ষিত হতে থাকে। বেল্টের গতির ফলে এই আধান অল্পক্ষণ পরে আর একগুচ্ছ সূচল

চিত্র 18·3

ভ্যান্-ডে-গ্রাফ্ উৎপাদক।

প্রান্ত বিশিষ্ট ($C_2$) পরিবাহী তারের সম্মুখে উপস্থিত হয়। ফলে এই পরিবাহী তারগুলির সূচল প্রান্তে করোণা-মোক্ষণ সৃষ্ট হয় এবং বেল্টের আধান এই তারগুলির মাধ্যমে এদের সংগে সংযুক্ত S ধাতব গোলকের উপরিতলে গিয়ে সঞ্চিত হয়। গোলকের উপরে আধান যত বৃদ্ধি পায়, এর বিভবও তত বাড়তে থাকে। গোলকটি বৃহদায়তন হওয়ার ফলে এর উপরে প্রচুর পরিমাণে আধান সঞ্চিত হতে পারে এবং এর বিভব খুব উচ্চমান পর্যন্ত বৃদ্ধি করা সম্ভব হয়। নির্দিষ্ট উচ্চতম মান প্রাপ্ত হবার পর বিভব আর বৃদ্ধি পায় না।

১৯৩১ সালে নির্মিত প্রথম যন্ত্রের সাহায্যে ভ্যান্-ডে-গ্রাফ্ (Van de Graff) 1·5 মিলিয়ন ভোল্ট বিভব উৎপন্ন করেন। এই বিভবের দ্বারা ত্বরিত এক একক আধানবাহী আয়নসমূহ ( যথা প্রোটন, ডয়টেরন ) 1·5 মি-ই-ভো শক্তি অর্জন করে। তিনি প্রায় 25 মাইক্রো-অ্যাম্পিয়ার আয়ন-প্রবাহ পান।

ভ্যান্-ডে-গ্রাফ্ উৎপাদকের সাহায্যে প্রাপ্ত উচ্চতম বিভবের মান নির্ভর করে এই যন্ত্রের বিভিন্ন অন্তরক পদার্থ নির্মিত অংশসমূহের এবং পারিপার্শ্বিক গ্যাসের অন্তরণ-ক্ষমতার (Insulating Power) উপরে। খুব উচ্চ বিভবে এদের অন্তরণ-ক্ষমতা বিনষ্ট হয় এবং স্ফুলিংগ সৃষ্ট হয়। সমগ্র যন্ত্রটিকে ফ্রিয়ন বা $CO_2$ মিশ্রিত উচ্চচাপ সম্পন্ন নাইট্রোজেন গ্যাস দ্বারা পরিপূর্ণ আধারের মধ্যে আবদ্ধ করে রাখলে অন্তরকতা-বিনাশক বিভবের (Insulation Breakdown Voltage) মান বৃদ্ধি পায়। নানারূপ সাবধানতা অবলম্বন করে আধুনিক কালে ভ্যান্-ডে-গ্রাফ্ উৎপাদকের সাহায্যে প্রায় দশ মিলিয়ন ভোল্ট পর্যন্ত বিভব উৎপন্ন করা সম্ভব হয়েছে।

কক্রফ্ট-ওয়াল্টন যন্ত্রের মত ভ্যান্-ডে-গ্রাফ্ উৎপাদক থেকে প্রাপ্ত বিভব একটি আয়ন উৎসের গাত্রে প্রয়োগ করা হয়। আয়নগুলি একটি খুব নিম্ন বায়ুচাপ সম্পন্ন T ত্বরণ-নলের (Accelerator Tube) মধ্য দিয়ে পরিভ্রমণ করে ভৌম বিভবে (Ground Potential) রাখা লক্ষ্যবস্তুর উপরে আপতিত হয়। স্পষ্টতঃ আপতন কালে এরা উৎপন্ন বিভবের পূর্ণ মাত্রার দ্বারা ত্বরিত হয়।

সাম্প্রতিক কালে ট্যান্ডেম (Tandem) পদ্ধতি ব্যবহার করে উৎপন্ন বিভবের দ্বারা ত্বরিত কণিকার শক্তির দ্বিগুণ শক্তি সম্পন্ন আহিত কণিকা পাওয়া সম্ভব হয়েছে। এই পদ্ধতিতে প্রথমে ভ্যান্-ডে-গ্রাফ্ উৎপাদকের সাহায্যে একগুচ্ছ ঋণাত্মক আয়নকে ত্বরিত করা হয়। এই ঋণাত্মক আয়ন-গুলি ধনাত্মক তড়িৎদ্বারে উপস্থিত হবার পরে তাদের দেহ সংলগ্ন একাধিক ইলেকট্রন পরিত্যাগ করে ধনাত্মক আয়নে রূপান্তরিত হয়। এরপর সেগুলিকে আবার উৎপাদকের মধ্যে ঋণাত্মক তড়িৎদ্বারের দিকে ফিরে পাঠান হয়। ফলে তাদের শক্তি দ্বিগুণ হয়ে যায়। এই পদ্ধতিতে 10 মিলিয়ন ভোল্ট বিভব উৎপন্ন করে 20 মি-ই-ভো পর্যন্ত শক্তিশালী প্রোটন বা ডয়টেরনগুচ্ছ পাওয়া যায়।

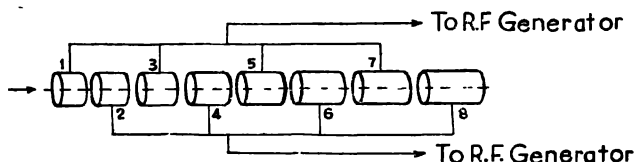
ভ্যান্-ডে-গ্রাফ্ উৎপাদকের সাহায্যে ত্বরিত আয়নগুলি সাধারণতঃ প্রায় সম্পূর্ণভাবে সমশক্তি সম্পন্ন হয়। এদের শক্তির বিস্তরণ (Energy Spread) খুবই কম হয়। এক মি-ই-ভো শক্তি সম্পন্ন আয়নের শক্তি বিস্তরণের পরিমাণ মাত্র 150 ই-ভো মত হয়। এই কারণে ভ্যান্-ডে-গ্রাফ্ উৎপাদকের সাহায্যে বিভিন্ন শক্তি-গ্রাহী (Endoergic) কেন্দ্রক-বিক্রিয়ার সূচনা শক্তি (Threshold Energy) খুব সঠিকভাবে নিরূপণ করা যায়।

তা ছাড়া নিম্নশক্তি কেন্দ্রক বিক্রিয়া সম্পর্কিত পরীক্ষার কাজে এই যন্ত্রের ব্যবহার বিশেষ ভাবে উপযোগী।

## 18·4 : রৈখিক ত্বরণযন্ত্র

কক্রফ্‌ট-ওয়াল্‌টন বা ভ্যান্‌-ডে-গ্রাফ্‌ উৎপাদক যন্ত্রে খুব উচ্চ বিভব উৎপন্ন করে আহিত কণিকাগুলিকে এক ধাপে এই উচ্চ বিভবের দ্বারা ত্বরিত করা হয়। এই পদ্ধতির সর্বাপেক্ষা গুরুতর অসুবিধা হচ্ছে যে এইরূপ উচ্চ বিভবের প্রভাবে পারিপার্শ্বিক গ্যাস এবং যন্ত্রের বিভিন্ন অন্তরক পদার্থ নির্মিত অংশের অন্তরণ-ক্ষমতা বিনষ্ট হয়ে যায়। সেইজন্য এই ধরনের যন্ত্রের সাহায্যে কয়েক মি-ই-ভো অপেক্ষা উচ্চতর শক্তি সম্পন্ন কণিকাগুচ্ছ উৎপন্ন করা সম্ভব হয় না।

পরবর্তী যুগে উদ্‌ভাবিত রৈখিক ত্বরণযন্ত্রে (Linear Accelerator) অথবা চক্রাবর্ত অনুনাদ ত্বরণযন্ত্রে (Cyclic Resonance Accelerator) আহিত কণিকাগুলি প্রতিধাপে কিছু কিছু শক্তি অর্জন করতে করতে অনেকগুলি ধাপ অতিক্রম করে এবং অবশেষে খুব উচ্চ শক্তি প্রাপ্ত হয়। সেজন্য এই জাতীয় যন্ত্রে অপেক্ষাকৃত কম বিভবের ( কয়েক হাজার থেকে এক লক্ষ ভোল্ট ) সাহায্যে অতি উচ্চশক্তি আয়নগুচ্ছ উৎপন্ন করা সম্ভব হয়।

রৈখিক ত্বরণযন্ত্র সর্বপ্রথম উদ্ভাবিত করেন উইডারো (Wideröe) ১৯২৮ সালে। ১৯৩১ সালে স্লোন্‌ এবং লরেন্স (D. H. Sloan and

চিত্র 18·4

রৈখিক ত্বরণযন্ত্র।

E. O. Lawrence) নামক আমেরিকান বিজ্ঞানীদ্বয় এইরূপ যন্ত্রের সাহায্যে একগুচ্ছ পারদ আয়নকে 1·26 মি-ই-ভো শক্তিতে ত্বরিত করতে সমর্থ হন। (18·4) চিত্রে এইরূপ যন্ত্রের কার্যপ্রণালী প্রদর্শিত হয়েছে।

চিত্র থেকে দেখা যায় যে আয়ন উৎসে উৎপন্ন আয়নগুচ্ছ পরপর অল্প ব্যবধানে স্থাপিত কতকগুলি বেলনাকৃতি প্রবাহ নলের (Drift Tubes) অক্ষ বরাবর সরলরেখা পথে পরিভ্রমণ করে। প্রথম, তৃতীয়, পঞ্চম প্রভৃতি বিজোড় ক্রমের নলগুলি পরস্পরের সংগে সংযুক্ত থাকে এবং এগুলিকে একটি বেতার-কম্পাংক সম্পন্ন পরিবর্তী বিভব সংকেত উৎপাদকের (R. F. Signal Generator) এক প্রান্তের (Terminal) সংগে সংযুক্ত করা হয়। অপরপক্ষে দ্বিতীয়, চতুর্থ, ষষ্ঠ প্রভৃতি জোড় ক্রমের নলগুলিকে উক্ত বিভব-সংকেত উৎপাদকের অপর প্রান্তে সংযুক্ত করা হয়। পরপর নলগুলির দৈর্ঘ্য ক্রম-বর্ধমান রাখা হয়।

স্লোন্ এবং লরেন্সের যন্ত্রে প্রতি সেকেণ্ডে 10 মিলিয়ন কম্পাংক এবং 42,000 ভোল্ট বিস্তার (Amplitude) সম্পন্ন পরিবর্তী বিভব ব্যবহার করা হয়।

মনে করা যাক যে ধনাত্মক আয়নগুলি যখন প্রথম প্রবাহ নল থেকে দ্বিতীয় নলে প্রবেশ করে সেই সময় দ্বিতীয় নলটি প্রথমটির সাপেক্ষে উচ্চতম ঋণাত্মক বিভব লাভ করে। ফলে নল দুটির অন্তর্বর্তী স্থান পার হবার সময়ে ধনাত্মক আয়নগুলি কিছুটা শক্তি অর্জন করে। যদি $V$ হয় পরিবর্তী বিভবের বিস্তার (Amplitude) তাহলে $\varepsilon$ আধান সম্পন্ন আয়নসমূহ $\varepsilon V$ শক্তি অর্জন করে। দ্বিতীয় নলের মধ্য দিয়ে পরিভ্রমণ কালে আয়নগুলির কোন শক্তি বৃদ্ধি হয় না। পরিবর্তী বিভবের কম্পাংক (Frequency) এমন ভাবে নিয়ন্ত্রিত করা হয় যে আয়নগুলি যখন দ্বিতীয় নল থেকে নির্গত হয়, তখন বিভবের দিক পরিবর্তিত হয় এবং তৃতীয় নলটি দ্বিতীয় নলের সাপেক্ষে উচ্চতম ঋণাত্মক বিভব লাভ করে। এর ফলে দ্বিতীয় নল থেকে তৃতীয় নলে সংক্রমণ কালে আয়নগুলি আবার $\varepsilon V$ পরিমাণ শক্তি অর্জন করে; অর্থাৎ এদের শক্তি $2\varepsilon V$ হয়। এর ফলে আয়নগুলি উচ্চতর বেগে তৃতীয় নল অতিক্রম করে। যখন এরা তৃতীয় নল থেকে নির্গত হয় তখন চতুর্থ নলটি তৃতীয় নলের সাপেক্ষে উচ্চতম ঋণাত্মক বিভবে আহিত হয়। এই ভাবে প্রত্যেকবার দুটি নলের অন্তর্বর্তী স্থান অতিক্রমণ কালে আয়নগুলি $\varepsilon V$ পরিমাণ অতিরিক্ত শক্তি অর্জন করে। যে কোন নলের মধ্যে পরিভ্রমণ কালে আয়নগুলির শক্তি অপরিবর্তিত থাকে। যেহেতু আয়নগুলি ক্রমবর্ধমান শক্তি সহকারে বিভিন্ন নলের মধ্য দিয়ে পরিভ্রমণ করে, পর পর স্থাপিত নলগুলির দৈর্ঘ্যও ক্রমবর্ধমান রাখা প্রয়োজন হয়। কারণ যে কোন নলের মধ্যে

আয়নের পরিভ্রমণ কাল পরিবর্তী বিভবের অর্ধ কম্পনকালের (Half Period) সমান হওয়ার প্রয়োজন, যাতে নল থেকে নির্গমন কালে বিভবের দিক ঠিক মত পরিবর্তিত হয়ে যায়। যেহেতু ত্বরিত কণিকাগুলির বেগ এদের শক্তির বর্গমূলের সংগে সমানুপাতিক, অতএব রৈখিক ত্বরণযন্ত্রের নলগুলির দৈর্ঘ্য $\sqrt{1}$, $\sqrt{2}$, $\sqrt{3}$ প্রভৃতি সংখ্যাগুলির সংগে সমানুপাতিক রাখার প্রয়োজন হয়।

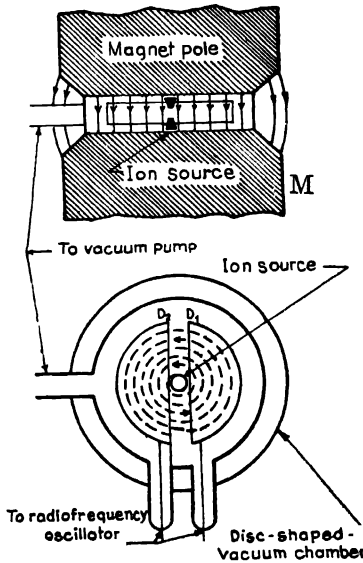
স্লোন্ এবং লরেন্স পরবর্তী যুগে এইরূপ একটি যন্ত্রের সাহায্যে 2·8 মি-ই-ভো শক্তি সম্পন্ন কণিকা উৎপন্ন করতে সমর্থ হন। ১৯৪৭ সালে ক্যালিফর্নিয়া বিশ্ববিদ্যালয়ে অ্যাল্ভারেজ় (L. W. Alvarez) সাতচল্লিশটি ত্বরণ-নল ব্যবহার করে প্রতি সেকেণ্ডে 200 মিলিয়ন কম্পাংক সম্পন্ন একটি কম্পন-উৎপাদকের (Oscillator) সাহায্যে অনেক উচ্চতর শক্তি সম্পন্ন প্রোটনগুচ্ছ উৎপাদন করেন। একটি ভ্যান্-ডে-গ্রাফ্ যন্ত্রের সাহায্যে প্রাপ্ত 4 মি-ই-ভো শক্তি সম্পন্ন প্রোটনগুচ্ছকে এই রৈখিক ত্বরণযন্ত্রের এক প্রান্তে অনুপ্রবেশ করান হয়। অপর প্রান্ত থেকে 32 মি-ই-ভো শক্তি সম্পন্ন প্রোটন-গুচ্ছ নিঃসৃত হয়। এই যন্ত্র থেকে প্রাপ্ত প্রোটনগুচ্ছের শক্তি-বিস্তরণ (Energy Spread) শতকরা 0·3 ভাগ মাত্র হয়। প্রোটনগুচ্ছের পার্শ্ব-বিস্তৃতিও (Lateral Spread) খুব কম হয়। উৎপন্ন প্রোটন-প্রবাহের মান প্রায় 0·5 মাইক্রো-অ্যামপিয়ার পাওয়া যায়।

পরবর্তী যুগে আরও উচ্চশক্তি সম্পন্ন প্রোটনগুচ্ছ উৎপন্ন করার জন্য এইরূপ কয়েকটি যন্ত্র নির্মিত হয়। তাছাড়া উচ্চশক্তি সম্পন্ন ইলেকট্রন উৎপাদনের জন্যও কয়েকটি রৈখিক ত্বরণযন্ত্র নির্মাণ করা হয়। শেষোক্ত যন্ত্রগুলি তরঙ্গ-চালক (Wave Guide) তত্ত্ব অনুযায়ী কাজ করে। এই শ্রেণীর সর্ববৃহৎ যন্ত্র সম্প্রতি আমেরিকার ষ্ট্যানফোর্ড বিশ্ববিদ্যালয়ে নির্মিত হয়েছে। এই যন্ত্রের সাহায্যে এক সহস্র কোটি ($10^{10}$) ইলেকট্রন ভোল্ট বা দশ জি-ই-ভো শক্তি সম্পন্ন ইলেকট্রনগুচ্ছ পাওয়া যায়। যন্ত্রটি প্রায় দুই মাইল লম্বা। ভূগর্ভস্থ দুটি সমান্তরাল সুড়ঙ্গের মধ্যে যন্ত্রটির বিভিন্ন অংশ স্থাপিত থাকে। এই শ্রেণীর যন্ত্রের কার্য পদ্ধতির বিস্তারিত আলোচনা বর্তমান গ্রন্থের বিষয় বহির্ভূত।

### 18·5 : সাইক্লোট্রন

১৯৩০ সালে ক্যালিফোর্নিয়া বিশ্ববিদ্যালয়ের অধ্যাপক লরেন্স (E. O. Lawrence) এই যন্ত্র উদ্ভাবিত করেন। রৈখিক ত্বরণযন্ত্রের মত

সাইক্লোট্রন যন্ত্রের মধ্যেও আয়নগুলি ধাপে ধাপে শক্তি অর্জন করে। তবে এক্ষেত্রে আয়নগুলি সরলরেখার পরিবর্তে একটি চৌম্বক ক্ষেত্রের প্রভাবে সর্পিল (Spiral) পথে পরিভ্রমণ করে। সাইক্লোট্রনের আবিষ্কার কেন্দ্রক-বিজ্ঞানের অগ্রগতির পথে একটি অত্যন্ত গুরুত্বপূর্ণ পদক্ষেপ। এই আবিষ্কারের জন্য ১৯৩৯ সালে লরেন্স নোবেল পুরস্কার প্রাপ্ত হন।

(18·5) চিত্রের সাহায্যে সাইক্লোট্রনের কার্যপদ্ধতি ব্যাখা করা যায়। M একটি বৈদ্যুতিক চুম্বক যার দুটি মেরুর মধ্যবর্তী স্থানে দুটি অর্ধবৃত্তাকার

চিত্র 18·5

সাইক্লোট্রনের কার্যপ্রণালী। উপরে সাইক্লোট্রনের উল্লম্ব প্রস্থচ্ছেদ ও নীচে অনুভূমিক প্রস্থচ্ছেদ দেখান হয়েছে।

ধাতব তড়িৎদ্বার রাখা থাকে। (18·5) নীচের চিত্রে প্রদর্শিত $D_1$, $D_2$ তড়িৎদ্বার দুটি ইংরাজী D অক্ষরের আকৃতি সম্পন্ন হয় বলে এগুলিকে 'ডী' আখ্যা দেওয়া হয়। এগুলি প্রকৃতপক্ষে দুটি চ্যাপটা এবং ফাঁপা অর্ধবৃত্তাকার পাত্র। একটি জুতার কালির চ্যাপটা কৌটোকে দুটি সমান খণ্ডে কাটলে প্রত্যেকটির যেরূপ আকৃতি হয়, এই 'ডী' গুলি ঠিক সেইরূপ আকৃতি বিশিষ্ট হয়। এদের প্রত্যেকটির ব্যাসার্ধ বৈদ্যুতিক চুম্বকের মেরুদ্বয়ের ব্যাসার্ধের সমান

হয়। 'ডী' দুটি পরস্পরের থেকে অন্তরিত থাকে এবং এদের মধ্যে বেতার কম্পাংক সম্পন্ন পরিবর্তী বিভব প্রয়োগ করা হয়। 'ডী' দুটির মধ্যবর্তী অঞ্চলের ঠিক কেন্দ্রস্থলে একটি আয়ন উৎস রাখা থাকে। 'ডী' গুলি এবং আয়ন উৎস একটি খুব নিম্ন বায়ুচাপ সম্পন্ন আধারের মধ্যে অবস্থিত থাকে।

আয়ন উৎস থেকে নিঃসৃত ধনাত্মক আয়নগুলি ( যথা প্রোটন, ডয়টেরন, α-কণিকা ) যে কোন একটি 'ডী' এর ($D_1$) বিভবের দ্বারা আকৃষ্ট হয়ে কিছু পরিমাণ শক্তি অর্জন করে এর মধ্যে প্রবেশ করে। চৌম্বক ক্ষেত্রের প্রভাবে আয়নগুলি $D_1$ এর মধ্যে একটি অর্ধবৃত্তাকার পথে পরিভ্রমণ করে। এই সময়ে $D_1$ এর বিভব পরিবর্তিত হলেও আয়নগুলির শক্তির কোন পরিবর্তন হয় না। কারণ ধাতু নির্মিত ফাঁপা 'ডী' গুলি তড়িৎ-আবরণীর (Electric Shield) কাজ করে। অর্ধবৃত্তাকার পথ অতিক্রম করে আয়নগুলি যখন $D_1$ থেকে নির্গত হয়ে 'ডী' দুটির অন্তর্বর্তী স্বল্প পরিসর ব্যবধানের মধ্যে প্রবেশ করে, ঠিক সেই সময়ে $D_2$ যদি $D_1$ এর সাপেক্ষে উচ্চতম ঋণাত্মক বিভব লাভ করে, তাহলে আয়নগুলি এদের মধ্যেকার ব্যবধান অতিক্রম করার সময়ে আবার কিছুটা শক্তি অর্জন করে। যদি পরিবর্তী বিভবের বিস্তার (Amplitude) $V$ হয় এবং ε হয় আয়নগুলির আধান তাহলে আয়ন কর্তৃক অর্জিত শক্তির পরিমাণ $\varepsilon V$ হয়।

$D_2$ এর মধ্যে আয়নগুলি আবার চৌম্বক ক্ষেত্রের প্রভাবে অর্ধবৃত্তাকার পথে পরিভ্রমণ করে। যেহেতু এদের শক্তি এখন পূর্বাপেক্ষা বেশী হয়, এদের পরিভ্রমণ পথের ব্যাসার্ধও পূর্বের তুলনায় বেশী হয়। $D_2$ এর মধ্যে পরিভ্রমণ কালে আয়নগুলির শক্তির কোন পরিবর্তন হয় না। $D_2$ থেকে নির্গমন কালে পরিবর্তী বিভবের দিক আবার পরিবর্তিত হয়ে যায়, যার ফলে আয়নগুলি $D_2$ থেকে $D_1$ পর্যন্ত যেতে আবার $\varepsilon V$ পরিমাণ শক্তি অর্জন করে। এইভাবে বারবার আয়নগুলি 'ডী' দুটির অন্তর্বর্তী স্থানে $\varepsilon V$ পরিমাণ শক্তি অর্জন করে, যার ফলে এরা ক্রমবর্ধমান ব্যাসার্ধ সম্পন্ন অর্ধবৃত্তাকার পথে 'ডী' দুটির মধ্যে পরিভ্রমণ করে। অর্থাৎ আয়নগুলি ক্রম-প্রসরণশীল সর্পিল (Spiral) পথে পরিভ্রমণ করতে করতে অবশেষে খুব উচ্চশক্তি অর্জন করে ( 18·5 চিত্র দ্রষ্টব্য )।

স্পষ্টতঃ এই পদ্ধতিতে আয়নগুলিকে ত্বরিত করতে হলে সেগুলিকে 'ডী' দুটির মধ্যবর্তী স্থানে এমন সময়ে প্রবেশ করতে হবে যে ঠিক সেই মুহূর্তে এদের মধ্যেকার পরিবর্তী বিভব উচ্চতম মানে এবং প্রয়োজনীয় দিকে ক্রিয়াশীল

থাকে। অর্থাৎ যে কোন একটি 'ডী' এর মধ্যে অর্ধবৃত্তাকার পথ পরিভ্রমণ করবার জন্য আয়নগুলির যে সময় লাগে তা পরিবর্তী বিভবের অর্ধকম্পন কালের (Half Period) সমান হওয়া প্রয়োজন।

আমরা পূর্বেই দেখেছি যে 'ডী' দুটির অভ্যন্তরে পরিভ্রমণ কালে আয়নগুলির শক্তি বা বেগ পরিবর্তিত হয় না। মনে করা যাক যে কোন একটি 'ডী' এর মধ্যে পরিভ্রমণশীল $\varepsilon$ আধান সম্পন্ন আয়নের বেগ $v$ হয় এবং পরিভ্রমণ পথের ব্যাসার্ধ $r$ হয়। যদি চৌম্বক ক্ষেত্রের মান $H$ হয়, এবং আয়নের ভর $M$ হয়, তাহলে আমরা লিখতে পারি

$$\frac{H\varepsilon v}{c} = Mv^2/r$$

এখানে $H$ তড়িৎচুম্বকীয় এককে ($e.\ m.\ u.$) এবং $\varepsilon$ স্থিরতড়িৎ এককে ($e.\ s.\ u.$) প্রকাশিত হয়েছে। উপরের সমীকরণ থেকে পাওয়া যায়

$$r/v = Mc/H\varepsilon$$

সুতরাং আয়ন কর্তৃক অর্ধবৃত্তাকার পথ পরিভ্রমণের জন্য প্রয়োজনীয় সময় হচ্ছে

$$t = \frac{\pi r}{v} = \frac{\pi Mc}{H\varepsilon} \tag{18·1}$$

স্পষ্টতঃ এই সময়ের মান পরিভ্রমণ পথের ব্যাসার্ধ ($r$) বা আয়নের বেগের ($v$) উপর নির্ভর করে না। কেবল আয়নের প্রকৃতির ($\varepsilon/M$) উপর নির্ভর করে। অর্থাৎ নির্দিষ্ট $\varepsilon/M$ সম্পন্ন আয়নের ক্ষেত্রে $t$ ধ্রুবক হয়। যদি এর মান পরিবর্তী বিভবের অর্ধকম্পন কালের ($T/2$) সমান হয়, তাহলে আমরা পাই

$$\frac{\pi Mc}{H\varepsilon} = \frac{T}{2} \tag{18·2}$$

যেহেতু পরিবর্তী বিভবের কম্পাংক (Frequency) $f = 1/T$ হয়, অতএব আমরা পাই

$$f = \frac{H\varepsilon}{2\pi Mc} \tag{18·3}$$

(18·3) সমীকরণকে বলা যায় অনুনাদ-শর্ত (Resonance Condition)। পরিবর্তী বিভব এবং আয়নগুলির আবর্তনের মধ্যে

অনুনাদ্ হলে তবেই আয়নগুলি প্রত্যেকবার 'ডী' ব্যবধান পার হবার সময়ে $\varepsilon V$, পরিমাণ শক্তি অর্জন করবে। আয়নগুলি যদি মোট $n$ সংখ্যক বার 'ডী' ব্যবধান পার হবার পর 'ডী' গুলির প্রান্ত-সীমায় উপস্থিত হয়, তাহলে এদের মোট অর্জিত শক্তি $n\varepsilon V$ হবে। যদি 'ডী' দুটির ব্যাসার্ধ হয় $R$ এবং $v_m$ হয় আয়ন কর্তৃক অর্জিত চরম বেগ, তাহলে আমরা পাই

$$\frac{H\varepsilon v_m}{c}=\frac{Mv_n}{R}$$

$$v_m=\frac{H\varepsilon R}{Mc} \tag{18·4}$$

সুতরাং আয়নগুলির চরম শক্তি হবে

$$E=\tfrac{1}{2}Mv_m{}^2=\frac{H^2\varepsilon^2R^2}{2Mc^2}=2\pi^2f^2MR^2 \tag{18·5}$$

সমীকরণ (18·5) থেকে দেখা যায় যে আয়নগুলির চরমশক্তির মান 'ডী' দুটির ব্যাসার্ধের ( অর্থাৎ চৌম্বক মেরুর ব্যাসার্ধের ) উপর নির্ভর করে। অর্থাৎ উচ্চতর শক্তি পেতে হলে চৌম্বক মেরুর ব্যাস বাড়াতে হবে।

সাইক্লোট্রনে ব্যবহৃত চৌম্বক ক্ষেত্রের মান দশ হাজার গাওস (Gauss) অথবা আরও উচ্চ হয়। (18·2) সমীকরণের সাহায্যে এইরূপ উচ্চ চৌম্বক ক্ষেত্রের জন্য প্রয়োজনীয় পরিবর্তী বিভব কম্পাংক নির্ণয় করা যায়। যদি ত্বরিত আয়নগুলি প্রোটন হয়, এবং $H=15{,}000$ গাওস হয়, তাহলে আমরা পাই

$$f=\frac{H\varepsilon}{2\pi Mc}=\frac{1·5\times10^4\times4·8\times10^{-10}}{2\times3·142\times1·67\times10^{-24}\times3\times10^{10}}$$
$$=23\times10^6$$

এই কম্পাংক বেতার কম্পাংকের (Radio Frequency) সমমাত্রিক।

অর্থাৎ সাইক্লোট্রনের সাহায্যে প্রোটন বা অন্যান্য আয়নসমূহকে ত্বরিত করতে হলে বেতার কম্পাংক এবং উচ্চ বিভব-বিস্তার সম্পন্ন কম্পন-উৎপাদক (Oscillator) ব্যবহার করা প্রয়োজন। বিভব-বিস্তার (Amplitude) যত উচ্চ হয়, তত কম সংখ্যক ধাপে আয়নগুলি পূর্ণশক্তি অর্জন করে। স্পষ্টতঃ এক্ষেত্রে আয়নগুলিকে অপেক্ষাকৃত কম পথ পরিভ্রমণ করতে হয়; সেজন্য নিম্নচাপ আধারের ভিতরে অবশিষ্ট গ্যাস অণুগুলির সংগে সংঘাতের ফলে

চিত্র 18·6

সাইক্লোট্রনের আলোকচিত্র।

( ক্যালিফর্নিয়া বিশ্ববিদ্যালয় বার্ক্‌লি, ক্যালিফর্নিয়ায় অবস্থিত লরেন্‌স বার্ক্‌লি ল্যাবরেটরীর সৌজন্যে প্রাপ্ত )

সেগুলির শক্তিক্ষয়ের সম্ভাব্যতাও অপেক্ষাকৃত কম হয়। এই বিভব-বিস্তার সাধারণতঃ 10,000 থেকে 20,000 ভোল্ট মত হয়।

লরেন্স প্রথম যে কার্যোপযোগী সাইক্লোট্রন নির্মাণ করেন তার চৌম্বক মেরুর ব্যাস ছিল প্রায় 37 ইঞ্চি, অর্থাৎ প্রায় 94 সেমি। পরে তাঁর তত্ত্বাবধানে আর একটি সাইক্লোট্রন নির্মিত হয়, যার চৌম্বক মেরুর ব্যাস ছিল প্রায় 60 ইঞ্চি, অর্থাৎ প্রায় 152 সেমি। এই যন্ত্রের সাহায্যে প্রায় 20 মি-ই-ভো শক্তি সম্পন্ন ডয়টেরন এবং প্রায় 40 মি-ই-ভো শক্তি সম্পন্ন $\alpha$-কণিকা পাওয়া যায়। বর্তমানে পৃথিবীর বিভিন্ন দেশে বহুসংখ্যক সাইক্লোট্রন নির্মিত হয়েছে।

চরম শক্তি অর্জন করার পরে আয়নগুলিকে সাইক্লোট্রনের চৌম্বক ক্ষেত্র থেকে নির্গত করে এনে কেন্দ্রক রূপান্তর সম্পর্কিত পরীক্ষা অনুষ্ঠিত করা হয়। এই উদ্দেশ্যে একটি 'ডী'-এর এক প্রান্তে একটি বিচ্যুতিকারক প্লেট (Deflecting Plate) স্থাপিত থাকে, যার উপরে ক্ষণিকের জন্য প্রায় 150 কিলো-ভোল্ট বিভব প্রয়োগ করে আয়নগুলিকে তাদের পরিভ্রমণ পথ থেকে বিচ্যুত করে বাইরে আনা হয়। এই ভাবে প্রাপ্ত আয়ন প্রবাহের মান প্রায় এক মিলি-অ্যাম্পিয়ার পর্যন্ত হয়।

সাইক্লোট্রন থেকে যে আয়নগুচ্ছ পাওয়া যায় তার প্রায় 1% বা আরও বেশী শক্তি-বিস্তরণ (Energy Spread) থাকে। অর্থাৎ ভ্যান্-ডে-গ্রাফ্ উৎপাদক থেকে যেরূপ প্রায় সমশক্তি সম্পন্ন আয়নগুচ্ছ পাওয়া যায় সাইক্লোট্রন থেকে তা পাওয়া যায় না।

(18·6) চিত্রে একটি সাইক্লোট্রনের আলোক চিত্র প্রদর্শিত হয়েছে।

(18·5) সমীকরণ থেকে দেখা যায় যে সাইক্লোট্রন চুম্বকের ব্যাস বৃদ্ধি করলে আয়নের চরম শক্তি বৃদ্ধি পায়। প্রকৃতপক্ষে কিন্তু 150 সেমি অপেক্ষা বৃহত্তর ব্যাস সম্পন্ন সাইক্লোট্রন নির্মাণ করার পথে প্রধান অন্তরায় হচ্ছে যে এইরূপ যন্ত্রে আয়নগুলি যে শক্তি অর্জন করে তার ফলে আপেক্ষিকতাবাদ অনুযায়ী তাদের 1% বা আরও বেশী ভর-বৃদ্ধি হয়ে থাকে। (18·2) সমীকরণ থেকে দেখা যায় যে পরিবর্তী বিভব এবং আয়নের আবর্তনের মধ্যে অনুনাদ ঘটা তখনই সম্ভব যখন 'ডী'গুলির মধ্যে আয়নের অর্ধাবর্তন কাল ধ্রুবক থাকে। (18·2) সমীকরণ অনুযায়ী এই অর্ধাবর্তন কালের মান আয়নের ভরের উপর নির্ভর করে। উচ্চশক্তি আয়নের ভর ধ্রুবক থাকে না। ভর

পরিবর্তন $M = M_0/\sqrt{1-\beta^2}$ এই সূত্রানুযায়ী ঘটে। এখানে $v/c = \beta$ লেখা হয়েছে। (18·3) সমীকরণ থেকে এক্ষেত্রে আবর্তন কম্পাংক পাওয়া যায়

$$f = \frac{H\varepsilon}{2\pi M_0 c}\sqrt{1-\beta^2}$$

অর্থাৎ বেগ বৃদ্ধির সংগে আবর্তন কম্পাংক $f$ হ্রাস পায়, যার ফলে অনুনাদ শর্ত রক্ষিত হয় না।

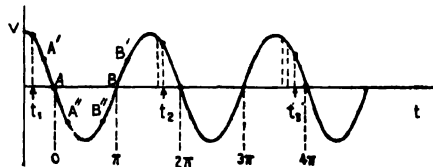
প্রকৃতপক্ষে আয়নের ভর বৃদ্ধি 1% বা বেশী হলে সাধারণ সাইক্লোট্রনের মধ্যে অনুনাদ শর্ত রক্ষা করা সম্ভব হয় না। প্রোটন, ডয়টেরন এবং α-কণিকার ক্ষেত্রে যথাক্রমে 10, 20 এবং 40 মি-ই-ভো অপেক্ষা উচ্চতর শক্তিতে এইরূপ ঘটে। অপরপক্ষে খুব হাল্‌কা হওয়ার জন্য, ইলেকট্রনের ক্ষেত্রে মাত্র 5000 ই-ভো অপেক্ষা উচ্চতর শক্তিতেই এইরূপ ঘটে। সুতরাং সাইক্লোট্রনের সাহায্যে ইলেকট্রন ত্বরণ একেবারেই সম্ভব হয় না।

## 18.6 : সিংক্রো-সাইক্লোট্রন

১৯৪৫ সালে আমেরিকান বিজ্ঞানী ম্যাক্‌মিলান (E. M. McMillan) এবং রুশ বিজ্ঞানী ভেক্‌স্‌লার (V. Veksler) স্বতন্ত্রভাবে দেখান যে সাইক্লোট্রনের সাহায্যে প্রোটন, ডয়টেরন, α-কণিকা প্রভৃতি ভারী আয়নের শক্তি বৃদ্ধির পথে উপরোক্ত প্রতিবন্ধক দূর করা সম্ভব, যদি প্রযুক্ত বেতার-কম্পাংক সম্পন্ন বিভবের কম্পাংক ক্রশমঃ হ্রাস করা যায় কিংবা যদি চৌম্বক ক্ষেত্রের মান সময়ের সংগে ক্রমশঃ বৃদ্ধি করা যায়। প্রথমোক্ত শ্রেণীর যন্ত্রকে 'কম্পাংক-নিয়ন্ত্রিত সাইক্লোট্রন' (Frequency Modulated Cyclotron) আখ্যা দেওয়া হয়। দ্বিতীয় শ্রেণীর যন্ত্রকে বলা হয় 'সিংক্রোট্রন' (Synchrotron)।

উভয় শ্রেণীর যন্ত্রের কার্যপ্রণালী নির্ভর করে আয়নসমূহের পরিভ্রমণ পথের 'দশা-স্থায়িত্ব' (Phase Stability) নামক ধর্মের উপরে। যেহেতু উচ্চশক্তি সম্পন্ন আয়নের ভর বেগের সংগে পরিবর্তিত হয়, অতএব নির্দিষ্ট চৌম্বক ক্ষেত্রে নির্দিষ্ট শক্তি সম্পন্ন কোন আয়ন একটি নির্দিষ্ট কক্ষপথে পরিভ্রমণ করতে পারে, যদি আয়নের আবর্তন কম্পাংক এবং প্রযুক্ত পরিবর্তী বিভবের কম্পাংক সমান হয়। এই নির্দিষ্ট শক্তি সম্পন্ন আয়নটি 'ডী' ব্যবধান পার হবার সময় যদি 'ডী'-বিভব শূন্য মানে থাকে, তাহলে এর শক্তির কোন পরিবর্তন হয় না

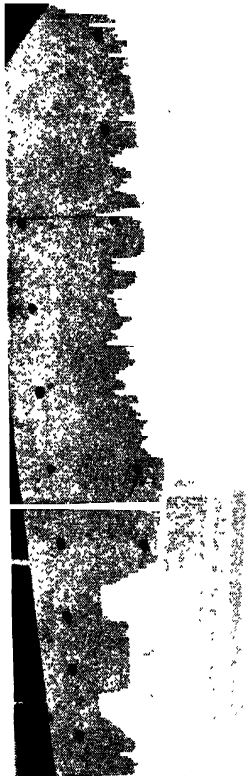
এবং আয়নটি অনির্দিষ্ট কাল ধরে উক্ত কক্ষপথে আবর্তন করতে পারে। অর্থাৎ এক্ষেত্রে আয়নটির কক্ষপথকে স্থায়ী কক্ষপথ (Stable Orbit) বলা যায়। এখন যদি চৌম্বক ক্ষেত্র ক্রমশঃ বৃদ্ধি করা যায় বা প্রযুক্ত পরিবর্তী বিভবের কম্পাংক হ্রাস করা যায়, তাহলে আয়নটি আর উক্ত কক্ষপথে আবর্তন করতে পারে না। এই অবস্থায় এটি ক্রম-বর্ধমান কক্ষপথে আবর্তন করতে থাকবে। কক্ষপথ যত বৃহত্তর হতে থাকবে আয়নের শক্তিও তত বৃদ্ধি পাবে। এর কারণ সহজেই বোঝা যায়। ধরা যাক যে পরিবর্তী বিভবের কম্পাংক ধীরে ধীরে হ্রাস করা হচ্ছে। এর ফলে স্থায়ী কক্ষপথে আবর্তনশীল একটি আয়ন যখন 'ডী'-ব্যবধানে এসে উপস্থিত হয়, তখন পরিবর্তী বিভবের মান শূন্য অপেক্ষা অল্প বেশী থাকে সুতরাং আয়নটি অল্প পরিমাণ শক্তি অর্জন করে। এইরূপ শক্তি অর্জন করার ফলে আয়নটি আর পূর্বের স্থায়ী কক্ষপথে আবর্তন করতে পারে না। এটি আর একটি নূতন বৃহত্তর স্থায়ী কক্ষপথে চলে যায়, যাতে এর আবর্তন কম্পাংক কিছুটা হ্রাস পেয়ে প্রযুক্ত বিভবের কম্পাংকের সংগে সমান হয়ে যায়। যেহেতু এই কম্পাংক ক্রমশঃ হ্রাস করা হয়, এই নূতন কক্ষপথে আসার পরেও আয়নটি পূর্বের মত আবার শক্তি অর্জন করতে থাকে এবং আরও বৃহত্তর স্থায়ী কক্ষপথে চলে যায়। এইভাবে কম্পাংক হ্রাস করার ফলে আয়নটি ক্রমাগতঃ শক্তি অর্জন করে ক্রম-বর্ধমান স্থায়ী কক্ষপথে আবর্তিত হতে হতে অবশেষে 'ডী' এর প্রান্ত সীমায় উপস্থিত হয়।

এইরূপ কম্পাংক-নিয়ন্ত্রিত (Frequency Modulated) সিংক্রো-সাইক্লোট্রনের (Synchro Cyclotron) একটি উল্লেখযোগ্য ধর্ম হচ্ছে যে

চিত্র 18·7

দশা-স্থায়িত্ব তত্ত্বের ব্যাখ্যা।

আয়ন কক্ষপথের দশা-স্থায়িত্বের জন্য এই জাতীয় সাইক্লোট্রনের মধ্যে আয়নগুলি গুচ্ছবদ্ধ ভাবে পরিভ্রমণ করে শক্তি অর্জন করে। (18·7) চিত্রে A বিন্দু দ্বারা

নির্দেশিত সময়ে পরিবর্তী বিভবের মান শূন্য থাকে এবং সময় বৃদ্ধির সংগে বিভব ক্রমশঃ আরও নিম্নাভিমুখী হয়। আয়নগুলি যদি এই সময়ে ডী-ব্যবধান পার হয় তাহলে তারা কোন শক্তি অর্জন না করে স্থায়ী কক্ষপথে আবর্তন করতে থাকে। অপরপক্ষে একটি আয়ন যদি অল্পক্ষণ পূর্বে $A'$ বিন্দু দ্বারা নির্দেশিত বিভব-দশায় ডী-ব্যবধানে উপস্থিত হয় তাহলে এই ব্যবধান পার হবার সময় সেটি কিছুটা শক্তি অর্জন করে এবং তার ভর বৃদ্ধি পায়। ফলে আয়নটির আবর্তন গতি মন্থর হয়ে যায় এবং পরের বার সেটি ডী-ব্যবধানে পূর্বের তুলনায় একটু দেরীতে পৌঁছায়। অর্থাৎ পরের বার সেটি অন্যান্য আয়নগুলির সংগে প্রায় একই সময়ে A বিন্দু দ্বারা নির্দেশিত দশায় ডী-ব্যবধান পার হয়। অনুরূপে যদি একটি আয়ন ডী-বিভব শূন্য হওয়ার অল্পক্ষণ পরে $A''$ বিন্দু দ্বারা নির্দেশিত দশায় ডী-ব্যবধান পার হয়, তাহলে সেটি কিছুটা শক্তি হারায় এবং তার ভর হ্রাস পায়। ফলে সেটি দ্রুততর গতিতে আবর্তন করে পরের বার অন্যান্য আয়নগুলির সংগে একই সময়ে ডী-ব্যবধানে উপস্থিত হয়। এইভাবে A বা তার নিকটবর্তী বিন্দুগুলির দ্বারা নির্দেশিত বিভব-দশায় যেসব আয়ন ডী-ব্যবধান পার হয়, তারা পরস্পরের সংগে গুচ্ছবদ্ধ ভাবে পরিভ্রমণ করে। যার ফলে সিংক্রো-সাইক্লোট্রন থেকে যথেষ্ট পরিমাণ আয়ন প্রবাহ পাওয়া সম্ভব হয়। অপরপক্ষে (18·7) চিত্রে প্রদর্শিত B বা তার নিকটবর্তী বিন্দুগুলির দ্বারা নির্দেশিত দশায় (যখন বিভব বর্ধনশীল থাকে) ডী-ব্যবধান অতিক্রমকারী আয়নগুলির ক্ষেত্রে এইরূপ গুচ্ছবদ্ধতা ঘটে না।

যেহেতু সিংক্রো-সাইক্লোট্রনের (Synchro Cyclotron) মধ্যে স্থায়ী কক্ষপথের মন্থরহারে ক্রম-প্রসারণের ফলে আয়নগুলি শক্তি অর্জন করে, অতএব এক্ষেত্রে সাধারণ সাইক্লোট্রনের তুলনায় আয়নগুলিকে অনেক বেশীবার আবর্তন করতে হয়। সুতরাং এই জাতীয় সাইক্লোট্রনের 'ডী' বিভবের বিস্তার (Amplitude) অপেক্ষাকৃত অনেক কম রাখা যায়। এর ফলে সাধারণ সাইক্লোট্রনে ব্যবহৃত কম্পন-উৎপাদকের (Oscillator) তুলনায় সিংক্রো-সাইক্লোট্রনে অপেক্ষাকৃত অনেক কম ( $\frac{1}{10}$ ভাগ ) ক্ষমতা (Power) সম্পন্ন কম্পন-উৎপাদক ব্যবহার করা যায়। সিংক্রো-সাইক্লোট্রনের মধ্যে আবর্তনরত একগুচ্ছ আয়ন যখন পূর্ণশক্তি লাভ করে, তখন কম্পন-উৎপাদকের কম্পাংক আবার আদি মানে ফিরিয়ে নিয়ে যাওয়া হয়। এর পরে নূতন একগুচ্ছ আয়নের আবর্তন শুরু হয়। অর্থাৎ এক্ষেত্রে আয়নগুলি ঝলকে ঝলকে আসতে থাকে। ফলে এইরূপ সাইক্লোট্রন থেকে প্রাপ্ত আয়ন প্রবাহ সাধারণ সাইক্লোট্রনের তুলনায় ক্ষীণতর ( $\sim 10^{-6}$ অ্যাম্পিয়ার ) হয়।

চিত্র 18৪

সিংক্রো-সাইক্রোট্রনের আলোকচিত্র।

( ক্যালিফর্নিয়া বিশ্ববিদ্যালয়, বার্ক্‌লি, ক্যালিফর্নিয়ায় অবস্থিত লরেন্‌স্ বার্ক্‌লি ল্যাবরেটরীর সৌজন্যে প্রাপ্ত )

আমেরিকার ক্যালিফর্নিয়া বিশ্ববিদ্যালয়ে লরেন্সের অধিনায়কত্বে সর্বপ্রথম সিংক্রো-সাইক্লোট্রন নির্মিত হয়। এই সাইক্লোট্রনে 184" বা 467 সেমি ব্যাস সম্পন্ন চুম্বক ব্যবহার করা হয় এবং এর থেকে প্রাপ্ত প্রোটনগুচ্ছের শক্তি প্রায় 350 মি-ই-ভো এবং $\alpha$-রশ্মিগুচ্ছের শক্তি প্রায় 380 মি-ই-ভো হয়। হিসাব করে দেখা যায় যে এইরূপ সাইক্লোট্রনে একটি প্রোটনকে পূর্ণ শক্তি অর্জন করতে প্রায় 208 কিমি দীর্ঘ পথ পরিভ্রমণ করতে হয়! উপরোক্ত সিংক্রো-সাইক্লোট্রনে ব্যবহৃত চুম্বকের ওজন প্রায় 4000 টন। পরবর্তী যুগে পৃথিবীর বিভিন্ন গবেষণাগারে আরও অনেকগুলি সিংক্রো-সাইক্লোট্রন নির্মিত হয়েছে। পৃথিবীর মধ্যে বৃহত্তম সিংক্রো-সাইক্লোট্রন নির্মিত হয়েছে রাশিয়ায়। এর চুম্বকের ব্যাস প্রায় 6 মিটার এবং এর থেকে 680 মি-ই-ভো প্রোটনগুচ্ছ পাওয়া যায়। (18·8) চিত্রে একটি সিংক্রো-সাইক্লোট্রনের আলোকচিত্র প্রদর্শিত হয়েছে।

এখানে উল্লেখযোগ্য যে কম্পন-উৎপাদকের কম্পাংক পরিবর্তন না করেও উচ্চতর শক্তিতে অনুনাদ শর্ত (18·3) রক্ষিত হতে পারে, যদি ব্যাসার্ধের সংগে পরিবর্ধনশীল চৌম্বক ক্ষেত্র ব্যবহার করা হয়। সাইক্লোট্রনের মধ্যে আবর্তনরত আয়নগুলি যত বেশী শক্তি অর্জন করে, ততই তারা বৃহত্তর ব্যাসার্ধের কক্ষপথে পরিভ্রমণ করে। অর্থাৎ কক্ষপথের ব্যাসার্ধ বৃদ্ধির সংগে তাদের ভর বৃদ্ধি পায়। সুতরাং ব্যাসার্ধ বৃদ্ধির সংগে যদি এমন ভাবে $H$ বৃদ্ধি পায় যে $(H/M)$ ধ্রুবক থাকে, তাহলে (18·3) সমীকরণ অনুযায়ী আয়নগুলির আবর্তন-কম্পাংক ধ্রুবক থাকবে। স্পষ্টতঃ এক্ষেত্রে পরিবর্তী বিভবের কম্পাংক ধ্রুবক রেখে আয়নগুলিকে ত্বরিত (Accelerate) করা যেতে পারে। এই পদ্ধতিতে ক্রিয়াশীল সাইক্লোট্রনের সাহায্যে পরিবর্তনশীল শক্তি সম্পন্ন (Variable Energy) আয়নগুচ্ছ পাওয়া সম্ভব। বিভিন্ন দেশের গবেষণাগারে এইরূপ সাইক্লোট্রন নির্মাণ করা হয়েছে। সম্প্রতি কলিকাতায় এই জাতীয় একটি সাইক্লোট্রন নির্মাণের কাজ শুরু হয়েছে। এর সাহায্যে 60 মি-ই-ভো শক্তি সম্পন্ন প্রোটনগুচ্ছ উৎপন্ন করা হবে।

## 18.7 : বীটাট্রন

সাইক্লোট্রন বা সিংক্রো-সাইক্লোট্রনের সাহায্যে ইলেকট্রন ত্বরণ সম্ভব হয় না। কারণ উচ্চশক্তি ইলেকট্রনের ক্ষেত্রে আপেক্ষিকতাবাদ জনিত ভর বৃদ্ধির পরিমাণ প্রোটন প্রভৃতি আয়নের তুলনায় অনেক বেশী হয়। আমেরিকান বিজ্ঞানী

কার্স্ট ( D. W. Kerst ) ১৯৪০ সালে বীটাট্রন (Betatron) নামে একটি অভিনব যন্ত্র আবিষ্কার করেন, যার সাহায্যে অতি উচ্চ শক্তি সম্পন্ন ইলেকট্রনগুচ্ছ উৎপন্ন করা সম্ভব।

এক মি-ই-ভো বা অনুরূপ শক্তি সম্পন্ন ইলেকট্রনের বেগ আলোকের বেগের খুব কাছাকাছি হয়। সেজন্য এক্ষেত্রে শক্তি বৃদ্ধির সংগে ইলেকট্রনের বেগ খুব বেশী পরিবর্তিত হয় না, কেবল ভর বৃদ্ধি পায়। বীটাট্রন যন্ত্রে ইলেকট্রনগুলি চৌম্বক ক্ষেত্রের প্রভাবে একটি নির্দিষ্ট ব্যাসার্ধ সম্পন্ন বৃত্তাকার কক্ষপথে আবর্তন করে। প্রযুক্ত চৌম্বক ক্ষেত্রের মান ক্রমশঃ বৃদ্ধি করা হয়, যাতে কক্ষপথের মধ্য দিয়ে প্রবহমান চৌম্বক ক্ষেত্রধারা (Flux) ক্রমশঃ বৃদ্ধি পায়। ফ্যারাডের তড়িৎচুম্বকীয় আবেশ সূত্র ( Law of Electromagnetic Induction ) অনুযায়ী কোন কুণ্ডলীর মধ্য দিয়ে প্রবহমান চৌম্বক ক্ষেত্রধারা সময়ের সংগে পরিবর্তিত হলে উক্ত কুণ্ডলীর মধ্যে তড়িৎচালক বল ( Electromotive Force ) আবিষ্ট হয়; অর্থাৎ একটি তড়িৎক্ষেত্র সৃষ্ট হয়।

ম্যাক্সওয়েলের তড়িৎচুম্বকীয় ক্ষেত্র সমীকরণ অনুযায়ী এইরূপ তড়িৎক্ষেত্রের উৎপত্তি কুণ্ডলীর উপস্থিতির উপরে নির্ভর করে না। অর্থাৎ কুণ্ডলী থাক বা না থাক, সময়ের সংগে চৌম্বক ক্ষেত্রধারা পরিবর্তিত হলে সব সময়েই একটি তড়িৎক্ষেত্র সৃষ্ট হয়, যার মধ্যে কোন আহিত কণিকা উপস্থিত থাকলে সেটি উক্ত ক্ষেত্রের প্রভাবে গতিশীল হয়। বীটাট্রনের মধ্যে এইরূপ আবিষ্ট তড়িৎক্ষেত্রের প্রভাবে ইলেকট্রনগুলি শক্তি অর্জন করে। যতক্ষণ চৌম্বক ক্ষেত্রের মান বৃদ্ধি পেতে থাকে, ইলেকট্রনগুলি ততক্ষণ ধরে শক্তি অর্জন করে।

ইলেকট্রনগুলি একটি বলয়াকৃতি নলের মধ্যে নির্দিষ্ট ব্যাসার্ধ সম্পন্ন কক্ষপথে আবর্তন করে। এই নলকে 'ডো-নাট' (Dough Nut) বলা হয়। ডো-নাটের ভিতরে বায়ুচাপ খুব নিম্নমানে রাখা হয়। একটি উত্তপ্ত ধাতব তন্তু থেকে নিঃসৃত ইলেকট্রনগুলিকে প্রায় 50,000 ভোল্ট বিভব প্রভেদ দ্বারা আকৃষ্ট করে ডো-নাটের মধ্যে অনুপ্রবেশ করান হয়। ডো-নাটটি একটি বৈদ্যুতিক চুম্বকের বিশেষ আকৃতি সম্পন্ন মেরুদ্বয়ের মধ্যে অবস্থিত থাকে (18·9 চিত্র দ্রষ্টব্য)। এই আকৃতি এমন হতে হয় যে মেরুদ্বয়ের মধ্যবর্তী কেন্দ্রীয় অঞ্চলে চৌম্বক ক্ষেত্রের মান ইলেকট্রনের আবর্তন কক্ষপথের উপরকার

চৌম্বক ক্ষেত্র অপেক্ষা উচ্চতর হয়। অর্থাৎ কেন্দ্রীয় অঞ্চলে মেরুদ্বয়ের ব্যবধান বহিরঞ্চল অপেক্ষা কম রাখা প্রয়োজন।

মনে করা যাক যে $R$ হচ্ছে ইলেকট্রনের কক্ষপথের ব্যাসার্ধ, $H$ হচ্ছে উক্ত কক্ষপথের উপরে চৌম্বক ক্ষেত্র, এবং $\phi$ হচ্ছে কক্ষপথের মধ্যে চৌম্বক ক্ষেত্রধারা ( Flux)।

তাহলে আমরা লিখতে পারি

$$Hev/c = Mv^2/R$$

এর থেকে পাওয়া যায়

$$pc = mvc = HeR \tag{18·6}$$

এখানে $p = mv$ হচ্ছে ইলেকট্রনের ভরবেগ। উপরে প্রদত্ত সম্পর্কটি আপেক্ষিকতাবাদ শাসিত উচ্চবেগ ইলেকট্রনের ক্ষেত্রেও প্রযোজ্য।

ফ্যারাডের তড়িৎচুম্বকীয় আবেশন সূত্র থেকে আবিষ্ট তড়িৎ চালক বল পাওয়া যায়

$$\varepsilon = \frac{1}{c}\frac{d\phi}{dt}$$

উপরের সমীকরণের ডানদিকের ঋণাত্মক চিহ্ন উপেক্ষা করা হয়েছে। যদি $E$ হয় সময়ের সংগে চৌম্বক ক্ষেত্র পরিবর্তনের জন্য আবিষ্ট তড়িৎ-ক্ষেত্রের মান, তাহলে আমরা পাই

$$\varepsilon = 2\pi RE$$

সুতরাং ইলেকট্রনের উপরে ক্রিয়াশীল বল হয়

$$F = eE = \frac{e\varepsilon}{2\pi R} = \frac{e}{2\pi Rc}\frac{d\phi}{dt} \tag{18·7}$$

আবার যেহেতু নিউটনের দ্বিতীয় সূত্র অনুযায়ী বল $F$ হচ্ছে ভরবেগ পরিবর্তনের হারের সমান, অতএব (18·6) সমীকরণ থেকে আমরা পাই

$$F = \frac{dp}{dt} = \frac{eR}{c}\frac{dH}{dt} \tag{18·8}$$

(18·7) ও (18·8) সমীকরণদ্বয় থেকে পাওয়া যায়

$$\frac{e}{2\pi Rc}\frac{d\phi}{dt} = \frac{eR}{c}\frac{dH}{dt}$$

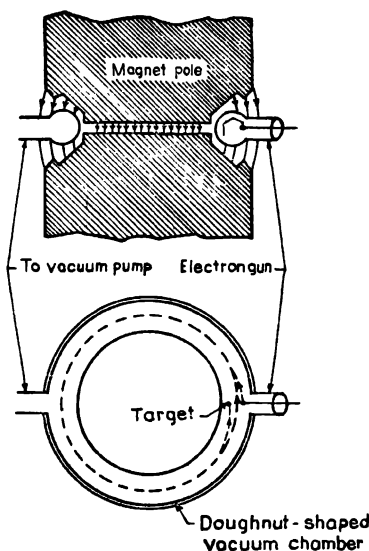
$$\frac{d\phi}{dt} = 2\pi R^2\frac{dH}{dt} \tag{18.9}$$

(18.9) সমীকরণকে বলা হয় 'বীটাট্রন শর্ত' (Betatron Condition)। এই সমীকরণের সমাকলন করে পাওয়া যায়

$$\phi - \phi_0 = 2\pi R^2 H \qquad (18{\cdot}10)$$

(18.10) সমীকরণ হচ্ছে বীটাট্রনের মধ্যে নির্দিষ্ট কক্ষপথে আবর্তনরত ইলেকট্রন কর্তৃক শক্তি অর্জনের শর্ত।

যদি দুটি মেরুর মধ্যে চৌম্বক ক্ষেত্র সর্বত্র সমান হয় তাহলে ইলেকট্রনের আবর্তন কক্ষপথের মধ্যে চৌম্বক ক্ষেত্রধারা $\pi R^2 H$ হবে। কিন্তু (18.10) সমীকরণ অনুযায়ী ক্ষেত্রধারার মান প্রকৃতপক্ষে এর দ্বিগুণ হতে হবে। এর থেকে প্রতীয়মান হয় যে কেন্দ্রীয় অঞ্চলে চৌম্বক ক্ষেত্রের মান অপেক্ষাকৃত উচ্চতর হওয়া প্রয়োজন।

তাত্ত্বিক বিশ্লেষণ দ্বারা দেখান যায় যে বীটাট্রনের মধ্যে ইলেকট্রন কক্ষপথের

চিত্র 18·9

বীটাট্রনের কার্যপ্রণালী। উপরের চিত্রে বীটাট্রনের উলম্ব প্রস্থচ্ছেদ এবং নীচের চিত্রে অনুভূমিক প্রস্থচ্ছেদ চিত্র দেখান হয়েছে।

স্থায়িত্বের জন্য বৃহত্তর ব্যাসার্ধের দিকে $H$ এর হ্রাস $\frac{1}{r}$ অপেক্ষা মন্থরতর হারে হওয়া প্রয়োজন।

সাধারণতঃ একটি উত্তপ্ত ধাতব তন্তু থেকে নিঃসৃত ইলেকট্রনগুচ্ছকে প্রায় 50,000 ভোল্ট বিভব দ্বারা আকৃষ্ট করে ডো-নাটের মধ্যে অনুপ্রবিষ্ট করান হয়। অনুপ্রবেশের সময়ে চৌম্বক ক্ষেত্র শূন্য থাকে এবং ক্রমবর্ধমান হয়।

চৌম্বক ক্ষেত্র যতক্ষণ বৃদ্ধি পায়, অর্থাৎ এক চতুর্থাংশ পর্যায়কাল ($T/4$) পর্যন্ত, ততক্ষণই পরিভ্রমণরত ইলেকট্রনগুলি শক্তি অর্জন করে। $T/4$ সময়ে চৌম্বক ক্ষেত্র যখন উচ্চতম হয় তখন একটি কুণ্ডলীর মধ্য দিয়ে ক্ষণস্থায়ী তড়িৎ প্রবাহ পাঠিয়ে মুহূর্তের জন্য অতিরিক্ত আর একটি চৌম্বক ক্ষেত্র সৃষ্টি করা হয়, যার প্রভাবে ইলেকট্রনগুলি স্থায়ী আবর্তন কক্ষপথ থেকে বিচ্যুত হয়ে কোন লক্ষ্যবস্তুর উপরে আপতিত হয়। এর ফলে উক্ত লক্ষ্যবস্তু (Target) থেকে X-রশ্মি নিঃসৃত হয়। নিঃসৃত X-রশ্মি ফোটনের উচ্চতম শক্তি ইলেকট্রনের শক্তির সমান হয়।

(18·6) সমীকরণ থেকে ইলেকট্রন কর্তৃক অর্জিত উচ্চতম শক্তি সহজেই নির্ণয় করা যায়ঃ

যদি $R=50$ সেমি এবং $H=10^4$ গাওস হয়, তাহলে আমরা পাই

$$pc=eRH=\frac{4{\cdot}8\times10^{-10}\times50\times10^4}{1{\cdot}6\times10^{-6}}=150 \text{ মি-ই-ভো}$$

যেহেতু ইলেকট্রনের স্থিরশক্তি $m_0c^2=0{\cdot}51$ মি-ই-ভো, অতএব $pc \gg m_0c^2$ হয়। সুতরাং এক্ষেত্রে ইলেকট্রনের মোট শক্তি $E=150$ মি-ই-ভো হয়।

কার্স্টের প্রথম যন্ত্রে 2·3 মি-ই-ভো শক্তি সম্পন্ন ইলেকট্রনগুচ্ছ উৎপন্ন করা হয়। পরবর্তী যুগে অনেক বৃহত্তর বীটাট্রন নির্মাণ করে কয়েকশত মি-ই-ভো শক্তি সম্পন্ন ইলেকট্রনগুচ্ছ উৎপন্ন করা সম্ভব হয়েছে। এইরূপ ইলেকট্রনগুচ্ছের সাহায্যে উৎপন্ন উচ্চশক্তি X-রশ্মি বর্তমানে জীববিদ্যা সম্বন্ধীয় নানারূপ গবেষণায় এবং ক্যান্সার প্রভৃতি রোগের চিকিৎসায় ব্যবহার করা হয়। সেইজন্য আজকাল আমেরিকা প্রভৃতি দেশে অনেক হাসপাতালে বীটাট্রন যন্ত্রের ব্যবহার বহুল প্রচলিত। তাছাড়া কেন্দ্রক বিজ্ঞান সম্বন্ধীয় গবেষণার কাজেও এইরূপ উচ্চশক্তি ইলেকট্রনগুচ্ছ এবং এর থেকে উৎপন্ন X-রশ্মি ব্যবহার করা হয়।

সাধারণতঃ বীটাট্রনের সাহায্যে প্রায় 350 মি-ই-ভো অপেক্ষা উচ্চতর শক্তি সম্পন্ন ইলেকট্রনগুচ্ছ উৎপন্ন করা সম্ভব হয় না। তার কারণ হচ্ছে যে

আবর্তনশীল ইলেকট্রনগুলি অভিকেন্দ্রিক ত্বরণের (Centripetal Acceleration) জন্য তড়িৎচুম্বকীয় বিকিরণ নিঃসৃত করে, যার ফলে তাদের শক্তিক্ষয় হতে থাকে। এই শক্তিক্ষয়ের হার যখন ইলেকট্রন কর্তৃক শক্তি অর্জনের হারের সংগে সমান হয়ে যায়, তখন আর ইলেকট্রনগুলিকে উচ্চতর শক্তিতে ত্বরিত করা সম্ভব হয় না।

## 18.8 : ইলেকট্রন-সিংক্রোট্রন

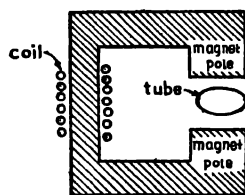
বীটাট্রন যন্ত্রে ব্যবহৃত বৈদ্যুতিক চুম্বক সাধারণতঃ বেশ ভারী হয়। 350 মি-ই-ভো শক্তি উৎপাদক বীটাট্রনের চুম্বকের ওজন প্রায় 350 টন হয়। পরবর্তী যুগে ইলেকট্রন-সিংক্রোট্রন (Synchrotron) নামক একটি যন্ত্র উদ্ভাবিত হয়, যার মধ্যে বীটাট্রন এবং সাইক্লোট্রন, উভয় প্রকার যন্ত্রের কার্যপদ্ধতির সমন্বয় ঘটান হয়। অর্থাৎ এই যন্ত্রে বীটাট্রনের মত ইলেকট্রনগুলিকে পরিবর্তী চৌম্বক ক্ষেত্রের প্রভাবে নির্দিষ্ট ব্যাসার্ধের একটি কক্ষপথে আবর্তিত করান হয় যার ফলে সেগুলি প্রথমে চৌম্বক ক্ষেত্রধারা (Flux) পরিবর্তনের জন্য প্রায় 2 মি-ই-ভো পর্যন্ত শক্তি অর্জন করে। এরপর সাইক্লোট্রনের মত বেতার কম্পাংক সম্পন্ন একটি পরিবর্তী বিভবের প্রভাবে ইলেকট্রনগুলি উচ্চতর শক্তি অর্জন করে।

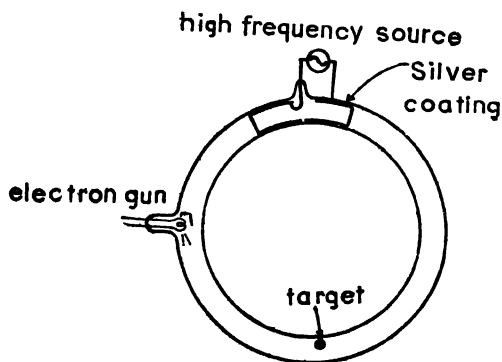
বীটাট্রন পদ্ধতিতে প্রাথমিক শক্তি অর্জন করার পরে ইলেকট্রনগুলি দশা-স্থায়ী (Phase Stable) কক্ষপথে আবর্তন করে। এই অবস্থায় এদের শক্তি এত উচ্চ হয় যে এদের বেগ প্রায় আলোকের বেগের ($c$) সমান হয়। ফলে ইলেকট্রনগুলির কৌণিক বেগ $\omega = v/R \simeq c/R$ প্রায় ধ্রুবক হয়। $H$ চৌম্বক ক্ষেত্রের প্রভাবে ইলেকট্রনগুলির উপরে ক্রিয়াশীল চৌম্বক বল এবং অপকেন্দ্রিক বলের সমতা থেকে আমরা পাই ( 18·6 সমীকরণ দ্রষ্টব্য )

$$\omega = \frac{He}{mc}$$

যেহেতু শক্তি বৃদ্ধির সংগে ইলেকট্রনের ভর $m$ বৃদ্ধি পায়, অতএব $H$ চৌম্বক ক্ষেত্রকে সমলয়ে বৃদ্ধি করে কৌণিক বেগ $\omega$ ধ্রুবক রাখা যায়।

ইলেকট্রন-সিংক্রোট্রনের সর্বাপেক্ষা উল্লেখযোগ্য সুবিধা হচ্ছে যে বীটাট্রনের তুলনায় এই যন্ত্রে ব্যবহৃত চুম্বকটি অনেক হাল্‌কা করা যায়। উদাহরণস্বরূপ 300 মি-ই-ভো শক্তি উৎপাদক সিংক্রোট্রন চুম্বকের ওজন প্রায় 8 টন হয়। এক্ষেত্রে ইলেকট্রনের কক্ষপথের অন্তর্বর্তী বেশীর ভাগ অঞ্চলে কোন চৌম্বক

ক্ষেত্র প্রয়োগের প্রয়োজন হয় না। কেবল যেখানে বলয়াকৃতি নিম্নচাপ সম্পন্ন নলটি ( ডো-নাট ) স্থাপিত থাকে সেই অঞ্চলে চৌম্বক ক্ষেত্র ক্রিয়া করলেই চলে। কারণ এই যন্ত্রে চৌম্বক ক্ষেত্রের প্রধান কাজ হচ্ছে ইলেকট্রনগুলিকে স্থায়ী কক্ষপথে আবর্তিত করান। এই কাজের জন্য এবং প্রথম দিকে বীটাট্রন পদ্ধতিতে কিছু শক্তি সঞ্চারিত করার জন্য ইংরাজী 'সী' (C) অক্ষরের মত উল্লম্ব প্রস্থচ্ছেদ সম্পন্ন চক্রাকার চুম্বক ব্যবহার করলেই চলে। অর্থাৎ বীটাট্রন চুম্বকের মধ্যবর্তী অঞ্চলে কোন লোহা না থাকলে চুম্বকটির আকৃতি যেরূপ হয় সিংক্রোট্রনের চুম্বকের আকৃতি সেইরূপ হয় (18·10 চিত্র দ্রষ্টব্য)।

চিত্র 18·10
ইলেকট্রন-সিংক্রোট্রন চুম্বকের উলম্ব প্রস্থচ্ছেদ চিত্র।

চৌম্বক মেরুদ্বয়ের মধ্যে অবস্থিত 'ডো-নাটের' অভ্যন্তরে ইলেকট্রনগুলি আবর্তন করে ( 18·11 চিত্র দ্রষ্টব্য )। কাঁচ বা পোর্সিলেন নির্মিত এই

চিত্র 18·11
ইলেকট্রন-সিংক্রোট্রনের কার্যপ্রণালী।

বলয়াকৃতি নলটির মধ্যে কিছু অংশে একটা ধাতব প্রলেপ থাকে। এই অংশটি একটি অনুনাদী-গহ্বরের (Resonant Cavity) মত কাজ করে। এর উপর নির্দিষ্ট বেতার কম্পাংকের পরিবর্তী বিভব প্রয়োগ করলে এর মধ্য দিয়ে পরিভ্রমণশীল ইলেকট্রনগুলি শক্তি অর্জন করে। বিভবের কম্পাংক ইলেকট্রনের আবর্তন-কম্পাংকের সমান রাখা হয়।

ইলেকট্রন-সিংক্রোট্রনের সাহায্যে সাধারণতঃ কয়েক শত মি-ই-ভো পর্যন্ত শক্তি সম্পন্ন ইলেকট্রনগুচ্ছ উৎপন্ন করা যায়। বীটাট্রনের মতই এই যন্ত্রের সাহায্যে খুব উচ্চশক্তি ইলেকট্রন উৎপন্ন করার পথে প্রধান অন্তরায় হচ্ছে উচ্চশক্তি ইলেকট্রন কর্তৃক তড়িৎচুম্বকীয় বিকিরণ নিঃসরণ। এই যন্ত্রের উচ্চতম শক্তিসীমা জি-ই-ভো ( $10^9$ ই-ভো ) মাত্রিক হয়।

## 18·9 : প্রোটন-সিংক্রোট্রন

সিংক্রোট্রন পদ্ধতিতে প্রোটন বা অন্যান্য প্রকার গুরুভার আয়নকেও উচ্চ-শক্তিতে ত্বরিত করা যায়। এক্ষেত্রে অবশ্য আয়নগুলির প্রাথমিক ত্বরণের জন্য বীটাট্রন পদ্ধতি প্রয়োগ করা সম্ভব নয়। ভ্যান্-ডে-গ্রাফ্ উৎপাদক বা অনুরূপ কোন ত্বরণযন্ত্রের (Accelerator) সাহায্যে প্রোটনগুলিকে প্রায় 10 মি-ই-ভো শক্তিতে ত্বরিত করে সেগুলিকে প্রোটন-সিংক্রোট্রনের বলয়াকৃতি নলের মধ্যে অনুপ্রবেশ করান হয়। নলটি চক্রাকার বৈদ্যুতিক চুম্বকের দুই মেরুর মধ্যে স্থাপিত থাকে। চুম্বকের উল্লম্ব প্রস্থচ্ছেদ ইংরাজী 'সী' (C) অক্ষরের মত হয়। চৌম্বক ক্ষেত্র ক্রমশঃ বৃদ্ধি করে প্রোটনগুচ্ছকে সমব্যাস সম্পন্ন কক্ষ পথে আবর্তিত করান হয়। প্রোটনগুচ্ছ পূর্ণ শক্তি অর্জন করার পর চৌম্বক ক্ষেত্রের ক্রিয়া বন্ধ করা হয়। তারপরে আবার নূতন আর একগুচ্ছ প্রোটনের ত্বরণ শুরু হয়।

ইলেকট্রন-সিংক্রোট্রনের মত প্রোটন-সিংক্রোট্রনে ব্যবহৃত পরিবর্তী বিভবের কম্পাংক ধ্রুবক রাখা যায় না। এক্ষেত্রে উক্ত কম্পাংকের কিছুটা পরিবর্তন করা প্রয়োজন হয়। কারণ প্রোটনের ভর ইলেকট্রনের তুলনায় অনেক বেশী হওয়ার জন্য প্রায় 1000 মি-ই-ভো পর্যন্ত শক্তি বৃদ্ধির সংগে এদের বেগ বৃদ্ধি পায়। ফলে নির্দিষ্ট ব্যাসার্ধের কক্ষপথে আবর্তনরত প্রোটনের কৌণিক বেগ ( $\omega$ ) বা আবর্তন-কম্পাংক ($f = \omega/2\pi$) ধ্রুবক থাকে না। প্রযুক্ত বিভবের সংগে প্রোটনের কক্ষীয় আবর্তনের অনুনাদ (Resonance) ঘটাতে হলে উক্ত বিভবের কম্পাংক ক্রমশঃ হ্রাস করা প্রয়োজন। ইলেকট্রন-সিংক্রোট্রনের

মত এক্ষেত্রেও বলয়াকৃতি ত্বরণনলের মধ্যে অবস্থিত অনুনাদী গহ্বরের (Resonant Cavity) মধ্যে ক্রিয়াশীল বেতার-কম্পাংক সম্পন্ন বিভবের প্রভাবে প্রোটনগুলি শক্তি অর্জন করে। প্রত্যেকবার আবর্তনকালে অর্জিত শক্তি মাত্র 1500 ই-ভো মত হয়। প্রোটনগুলি মোট কয়েক লক্ষ বার আবর্তন করে পূর্ণ শক্তি অর্জন করে।

প্রোটন-সিংক্রোট্রনের সাহায্যে সর্বাপেক্ষা উচ্চ শক্তি সম্পন্ন প্রোটনগুচ্ছ উৎপন্ন করা যায়। আমেরিকার বার্ক্‌লি শহরে অবস্থিত ক্যালিফর্নিয়া বিশ্ববিদ্যালয়ে নির্মিত এই জাতীয় একটি কণিকা ত্বরণযন্ত্রের সাহায্যে 6 জি-ই-ভো অর্থাৎ $6\times10^9$ ই-ভো শক্তি সম্পন্ন প্রোটনগুচ্ছ উৎপন্ন করা হয়। এই যন্ত্রটির নাম দেওয়া হয় 'বিভাট্রন' (Bevatron)। আমেরিকার ব্রুকহেভেন জাতীয় গবেষণাগারে অনুরূপ একটি যন্ত্র নির্মাণ করা হয়; এই যন্ত্রটির নাম দেওয়া হয় 'কসমোট্রন' (Cosmotron)। এর থেকে প্রায় 3 জি-ই-ভো শক্তি সম্পন্ন প্রোটনগুচ্ছ পাওয়া যায়। তাছাড়া ইংলণ্ডে বার্মিংহাম বিশ্ববিদ্যালয়ে অনুরূপ একটি একটি যন্ত্র নির্মাণ করা হয়। এই যন্ত্রগুলি আকারে অতি বিশাল হয়। উদাহরণস্বরূপ বিভাট্রন যন্ত্রে ব্যবহৃত 'ডো-নাট' বা ত্বরণ-নলটির ব্যাস হচ্ছে প্রায় 30·5 মিটার। এর বৈদ্যুতিক চুম্বকটির ওজন হচ্ছে প্রায় 10,000 টন।

পরবর্তী যুগে আরও উচ্চতর শক্তি উৎপাদক কয়েকটি প্রোটন-সিংক্রোট্রন নির্মাণ করা হয়েছে। এই যন্ত্রগুলির অতি বিশাল আকারের জন্য এদের মধ্যে প্রোটনগুচ্ছকে অতি দীর্ঘ পথ অতিক্রম করতে হয়। সেজন্য ত্বরণের পরে প্রাপ্ত প্রোটন-প্রবাহ সাধারণতঃ খুব ক্ষীণ হয়। এই প্রবাহ বাড়াতে হলে ত্বরণকালে প্রোটনগুলিকে খুব তীব্রভাবে ফোকাস করা প্রয়োজন। অত্যুচ্চ শক্তি সম্পন্ন প্রোট্রন-সিংক্রোট্রনে পরিবর্তী নতিমাত্রা (Alternating Gradient) সম্পন্ন চৌম্বক ক্ষেত্র ব্যবহারের দ্বারা প্রোটনগুচ্ছকে অতি তীব্রভাবে ফোকাস (Strong Focussing) করার ব্যবস্থা করা হয়। এই পদ্ধতি উদ্ভাবনের ফলে এই ধরনের যন্ত্র নির্মাণ কৌশলের প্রভূত উন্নতি সাধন হয়েছে এবং এদের নির্মাণের ব্যয়ভার হ্রাস করা সম্ভব হয়েছে।

বিভিন্ন স্থানে নির্মিত এই ধরনের যন্ত্রের মধ্যে উল্লেখযোগ্য হচ্ছে সুইজারল্যাণ্ডের জুরিখ শহরে সার্ন (Cern) নামক সংস্থার উদ্যোগে নির্মিত 28 জি-ই-ভো শক্তি উৎপাদক যন্ত্র, রাশিয়ায় সার্পুকভ গবেষণাগারে নির্মিত 70 জি-ই-ভো যন্ত্র এবং আমেরিকার ব্রুকহেভেন জাতীয় গবেষণাগারে নির্মিত

33 জি-ই-ভো যন্ত্র। শেষোক্ত যন্ত্রে 240টি ক্রমপর্যায়ে চক্রাকারে স্থাপিত চুম্বকের মেরুর মধ্যে ত্বরণ আধারটি অবস্থিত থাকে। প্রত্যেকটি চুম্বকের চৌম্বক ক্ষেত্রের কৈন্দ্রিক (Radial) নতিমাত্রা থাকে। পরপর দুটি চুম্বকের চৌম্বক ক্ষেত্রের নতিমাত্রা বিপরীতমুখী হয়। এইরূপ ব্যবস্থার দ্বারা আয়নগুচ্ছ অতি তীব্রভাবে ফোকাসিত হয় এবং আয়নগুচ্ছের প্রস্থচ্ছেদ খুব কম হয়, যার ফলে এই যন্ত্রের জন্য প্রয়োজনীয় চুম্বকের ওজন 3 জি-ই-ভো শক্তি সম্পন্ন কস্‌মোট্রন চুম্বকের ওজনের সংগে তুলনীয় হয়। অর্থাৎ কস্‌মোট্রন অপেক্ষা দশ গুণেরও বেশী শক্তি উৎপন্ন করা হলেও দুটি যন্ত্রের চুম্বকের জন্য খরচের বিশেষ পার্থক্য নেই। ব্রুকহেভেনের 33 জি-ই-ভো প্রোট্রন-সিংক্রোট্রন থেকে প্রতিবারে প্রায় $3\times10^{11}$ সংখ্যক প্রোটনের ঝলক পাওয়া যায়। সম্প্রতি 150 থেকে 300 জি-ই-ভো শক্তি সম্পন্ন কয়েকটি প্রোটন-সিংক্রোট্রন নির্মাণের পরিকল্পনা করা হয়েছে। এর মধ্যে আমেরিকার বাটাভিয়া শহরে একটি 200 জি-ই-ভো প্রোটন-সিংক্রোট্রন নির্মাণের কাজ শেষ হয়েছে। (18·12) চিত্রে একটি প্রোটন-সিংক্রোট্রনের আলোকচিত্র প্রদর্শিত হয়েছে।

পরিবর্তী নতিমাত্রা সম্পন্ন স্থিরমান চৌম্বক ক্ষেত্র (Fixed Field Alternating Gradient অথবা FFAG) ব্যবহার করে প্রোটন-সিংক্রোট্রন থেকে প্রাপ্ত প্রোটন প্রবাহমাত্রা বাড়িয়ে প্রায় $2\times10^{14}$ সংখ্যক প্রোটনের ঝলক পাওয়া সম্ভব হয়েছে। এছাড়া পর্যায়ে পর্যায়ে ত্বরিত আয়নগুচ্ছগুলিকে একটি ত্বরণহীন সঞ্চয়-বলয়ের (Storage Ring) মধ্যে প্রবেশ করিয়ে সঞ্চিত করার ব্যবস্থা করে দশ থেকে একশত অ্যাম্পিয়ার পর্যন্ত আয়ন প্রবাহ উৎপন্ন করা সম্ভব হয়। একটি স্থিরমান চৌম্বক ক্ষেত্রের সাহায্যে এই রকম সঞ্চয়-বলয়ের মধ্যে আয়নগুলিকে দীর্ঘ সময় ধরে চক্রাকারে আবর্তিত করা যায়। এই সময়ে এদের শক্তি বৃদ্ধি হয় না। অবশ্য চক্রাকারে আবর্তনশীল আয়নগুলি তড়িৎচুম্বকীয় তত্ত্ব অনুসারে কিছু শক্তিক্ষয় করে। সেজন্য সঞ্চয়-বলয়ের মধ্যে স্থানে স্থানে অল্প ব্যবধান রাখা হয়, যার মধ্যে প্রযুক্ত নির্দিষ্ট কম্পাংকের পরিবর্তী বিভবের সাহায্যে আয়নগুলিকে কিছু পরিমাণে শক্তি সরবরাহ করে এই শক্তিক্ষয় পূরণ করা হয়।

এখানে উল্লেখযোগ্য যে উচ্চশক্তি আয়ন যখন কোন স্থির লক্ষ্যের উপরে আঘাত করে তখন বিক্রিয়া উৎপাদনের জন্য প্রাপ্ত কার্যকরী শক্তির পরিমাণ আয়নের আদি শক্তি অপেক্ষা কম হয়। কারণ কিছু পরিমাণ শক্তি আঘাতের ফলে উৎপন্ন কণিকাগুলির গতিশক্তি সরবরাহ করতে ব্যয়িত হয়।

চিত্র 8·12
সিংক্রোট্রনের আলোকচিত্র।
ব্রুকহাভেন্ ন্যাশন্যাল ল্যাবরেটরীর সৌজন্যে প্রাপ্ত

আপেক্ষিকতাবাদ শাসিত অত্যুচ্চ শক্তির ক্ষেত্রে এইভাবে ব্যয়িত শক্তির পরিমাণ খুব বেশী হয়। উদাহরণস্বরূপ ধরা যাক যে $m_0$ স্থির ভর, $v$ বেগ এবং $T$ গতিশক্তি সম্পন্ন একটি আয়ন একটি সমভর স্থির পরমাণুকে আঘাত করে। এক্ষেত্রে

$$T=\frac{m_0c^2}{\sqrt{1-v^2/c^2}}-m_0c^2$$

অপরপক্ষে কণিকা দুটির ভরকেন্দ্রের সাপেক্ষে স্থির ফ্রেমে এদের বেগ সমান এবং বিপরীতমুখী হয়। এই ফ্রেমে এদের প্রত্যেকটির বেগ $v'$ এবং মোট গতিশক্তি $T'$ হলে আমরা পাই

$$T'=\frac{2m_0c^2}{\sqrt{1-v'^2/c^2}}-2m_0c^2$$

যেহেতু এই ফ্রেমে সংঘাতের পর কণিকা দুটির গতিশক্তি অপরিবর্তিত থাকে, অতএব $T'$ হচ্ছে সংঘাতের ফলে প্রাপ্ত মোট কার্যকরী শক্তি। স্পষ্টতঃ ল্যাবরেটারী ফ্রেমে ভরকেন্দ্রের বেগ $v'$ হয়, কারণ উক্ত ফ্রেমে আঘাত প্রাপ্ত কণিকাটির আদি বেগ শূন্য হয়। সুতরাং আইষ্টাইনের বেগ-সংযোজন সূত্র অনুযায়ী পাওয়া যায়

$$v=\frac{v'+v'}{1+v'^2/c^2}=\frac{2v'}{1+v'^2/c^2}$$

উপরের সমীকরণ তিনটি থেকে পাওয়া যায়

$$T=2T'+\frac{T'^2}{2m_0c^2}$$

যদি $T' >> m_0c^2$ হয়, তাহলে $T\approx T'^2/2m_0c^2$ হয়। অর্থাৎ $T>>T'$ হয়। এর থেকে দেখা যায় যে অতি উচ্চ শক্তিতে কার্যকরী শক্তির পরিমাণ খুব কমে যায়।

উদাহরণস্বরূপ যদি $T'=10m_0c^2$ হয় (অর্থাৎ প্রোটনের ক্ষেত্রে $T'=9{\cdot}3$ জি-ই-ভো হয়), তাহলে আমরা পাই

$$T=20m_0c^2+\frac{(10m_0c^2)^2}{2m_0c^2}=70m_0c^2$$

প্রোটনের ক্ষেত্রে $T=65$ জি-ই-ভো হয়। অর্থাৎ 65 জি-ই-ভো আদি শক্তি

সম্পন্ন প্রোটন যখন একটি স্থির প্রোটনকে আঘাত করে তখন মোট কার্যকরী শক্তি মাত্র 9·3 জি-ই-ভো হয়। উপরের আলোচনা থেকে দেখা যায় যে খুব উচ্চশক্তি বিক্রিয়া উৎপাদনের জন্য বিক্রিয়া-শক্তি অপেক্ষা বহুগুণ বেশী শক্তি সম্পন্ন কণিকা ত্বরণযন্ত্র নির্মাণ করার প্রয়োজন।

সাম্প্রতিক কালে এক অভিনব পন্থা অবলম্বন করে বিক্রিয়া লব্ধ শক্তি এবং বিক্রিয়া উৎপাদক কণিকা শক্তির মধ্যে উপরোক্ত তারতম্য দূর করার প্রচেষ্টা হয়েছে। এই পদ্ধতিতে দুইগুচ্ছ বিপরীতমুখী সমশক্তি প্রোটনের মধ্যে সংঘাত সৃষ্টি করার ব্যবস্থা করা হয়। এর ফলে প্রাপ্ত বিক্রিয়া-শক্তি প্রতিটি প্রোটনগুচ্ছের শক্তির দ্বিগুণ হয়। অর্থাৎ উপরে আলোচিত উদাহরণে 9·3 জি-ই-ভো বিক্রিয়া শক্তি উৎপাদনের জন্য 4·65 জি-ই-ভো শক্তি সম্পন্ন দুইগুচ্ছ বিপরীতমুখী প্রোটনের প্রয়োজন। এই ধরনের বিপরীতমুখী উচ্চশক্তি প্রোটনগুচ্ছের মধ্যে সংঘাত ঘটান হয় উপরে আলোচিত দুটি সঞ্চয়-বলয়ের সাহায্যে। বলয় দুটির কিছু অংশ পরস্পর সংলগ্ন এবং সমাপতিত থাকে। এদের মধ্যে সঞ্চিত বিপরীতমুখী প্রোটনগুচ্ছ এই অংশের মধ্যে প্রোটন কক্ষপথদ্বয়ের সাধারণ স্পর্শক বরাবর সংঘাত লাভ করে। সাধারণতঃ কঠিন বা তরল লক্ষ্যের কেন্দ্রকগুলির সংগে আপতিত প্রোটনগুচ্ছের সংঘাত লাভের সম্ভাব্যতার তুলনায় বিপরীত মুখে আবর্তনরত প্রোটনগুলির মধ্যে সংঘাত লাভের সম্ভাব্যতা অনেক কম হয়। কিন্তু সঞ্চয়-বলয়ের মধ্যে আবর্তনরত প্রোটন-প্রবাহের মান খুব উচ্চ হওয়ার জন্য উপরে আলোচিত পরীক্ষা ব্যবস্থায় প্রোটনগুলির মধ্যে সংঘাত লাভের সম্ভাব্যতা যথেষ্ট উচ্চ হয়।

১৯৭১ সালে সার্নের (Cern) গবেষণাগারে দুইগুচ্ছ উচ্চশক্তি ইলেকট্রনের মধ্যে এইরূপ সংঘাত ঘটান হয়েছে। অনুরূপ অবস্থায় প্রোটনগুচ্ছের মধ্যে সংঘাত ঘটানর প্রচেষ্টা চলছে।

প্রোটন-সিংক্রোট্রনের দ্বারা ত্বরিত প্রোটনের শক্তি মহাজাগতিক রশ্মির (Cosmic Ray) শক্তির সংগে তুলনীয়। এইরূপ অত্যুচ্চ শক্তি সম্পন্ন প্রোটনগুচ্ছের সাহায্যে নানারূপ মৌলিক কণিকা উৎপাদন এবং এদের ধর্মাবলী নিরূপণ করা সম্ভব। এ সম্বন্ধে বিংশতিতম পরিচ্ছেদে আলোচনা করা হবে।

# কেন্দ্রক বিভাজন, ইউরেনিয়ামোত্তর মৌল ও কেন্দ্রক সংযোজন

## 19·1 : কেন্দ্রক বিভাজনের আবিষ্কার

সপ্তদশ পরিচ্ছেদে দেখা গেছে যে কেন্দ্রক বিক্রিয়া ঘটবার সময় সাধারণতঃ যৌগ-কেন্দ্রকটি (Compound Nucleus) একটি অপেক্ষাকৃত স্বল্পভার কেন্দ্রকীয় কণিকা নিঃসৃত করে এবং তার ফলে যে অবশিষ্ট কেন্দ্রক উৎপন্ন হয় তার ভর যৌগ-কেন্দ্রকের ভরের সংগে তুলনীয় হয়। ১৯৩৯ সালে জার্মান বিজ্ঞানীদ্বয় হান্ এবং ষ্ট্রাস্‌মান (Otto Hahn and F. Strassmann) এক নূতন ধরনের শক্তি-দায়ী (Exoergic) কেন্দ্রক বিক্রিয়া আবিষ্কার করেন যা পরবর্তী যুগে কেন্দ্রকের অন্তর্নিহিত বিপুল শক্তি ভাণ্ডারের ব্যবহারিক প্রয়োগের পথ সুগম করে দেয়।

(17·14) অনুচ্ছেদে আমরা দেখেছি যে ১৯৩৪ সালে ফের্মি এবং তাঁর সহকর্মীবৃন্দ বহু সংখ্যক মৌল নিয়ে নিউট্রন-আহরণ (Neutron Capture) জাতীয় বিক্রিয়া সংক্রান্ত নানারূপ পরীক্ষা অনুষ্ঠিত করেন। অন্যান্য মৌলের সংগে তাঁরা যখন পর্যায় সারণীর সর্বশেষ প্রাকৃতিক মৌল ইউরেনিয়ামের ($Z=92$) উপরেও নিউট্রন বর্ষণ করেন, তখন তাঁরা কয়েকটি নূতন ক্ষণস্থায়ী $\beta^-$ বিঘটনশীল তেজস্ক্রিয় পদার্থ উৎপন্ন হওয়ার নিদর্শন পান। এদের উৎপত্তির কারণ ব্যাখ্যা করতে গিয়ে তাঁরা অনুমান করেন যে অন্যান্য পদার্থের মত $U^{238}$ আইসোটোপ নিউট্রন শোষণের ফলে $U^{239}$ আইসোটোপে রূপান্তরিত হয়। এই ভাবে উৎপন্ন $U^{239}$ আইসোটোপের $\beta^-$ বিঘটনের ফলে $Z=93$ পরমাণবিক সংখ্যা সম্পন্ন ইউরেনিয়ামোত্তর (Transuranic) মৌলের একটি আইসোটোপ সৃষ্ট হয়। আবার এই আইসোটোপটির $\beta^-$ বিঘটনের ফলে $Z=94$ পরমাণবিক সংখ্যা সম্পন্ন পরবর্তী ইউরেনিয়ামোত্তর মৌল সৃষ্ট হয়। ফের্মি ও তাঁর সহকর্মীগণের মতে উপরোল্লিখিত তেজস্ক্রিয় পদার্থগুলি হচ্ছে ক্রমায়াত (Successive) $\beta^-$ বিঘটনের ফলে সৃষ্ট এইসব বিভিন্ন ইউরেনিয়ামোত্তর মৌল।

এর পরে জার্মানীতে হান্, মাইৎনার এবং ষ্ট্রাস্‌মান (O. Hahn, L. Meitner and F. Strassmann) এবং ফ্রান্সে কুরী এবং সাভিচ্ (Irene Curie and L. Savich) রাসায়নিক পদ্ধতিতে এইসব নূতন তেজস্ক্রিয় পদার্থগুলির স্বরূপ নির্ণয়ের চেষ্টা করেন। হান্ এবং তাঁর সহযোগীগণ লক্ষ্য করেন যে নিউট্রন বর্ষণের ফলে ইউরেনিয়ামের মধ্যে যে সব নূতন তেজস্ক্রিয় পদার্থ সৃষ্ট হয় তাদের মধ্যে একটির রাসায়নিক ধর্ম বেরিয়াম মৌলের ($Z=56$) অনুরূপ। অপরপক্ষে কুরী এবং সাভিচের পরীক্ষা থেকে প্রমাণিত হয় উৎপন্ন তেজস্ক্রিয় পদার্থগুলির মধ্যে একটি হচ্ছে ল্যান্‌থানাম মৌলের ($Z=57$) সমধর্মী।

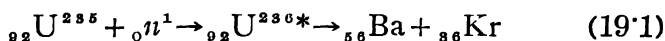
যেহেতু বেরিয়াম বা ল্যান্‌থানাম পরমাণুর ভর বা পরমাণবিক সংখ্যা ইউরেনিয়ামের তুলনায় অনেক কম, অতএব কেন্দ্রক বিক্রিয়া সম্পর্কিত তৎকালীন প্রচলিত ধারণা অনুযায়ী উপরোক্ত পরীক্ষালব্ধ তথ্যগুলি ব্যাখ্যা করা সম্ভব নয়। কারণ প্রোটন, ডয়টেরন, $\alpha$-কণিকা প্রভৃতি অপেক্ষাকৃত হালকা কেন্দ্রকীয় কণিকা নিঃসরণের ফলে যে সব অবশিষ্ট কেন্দ্রক সৃষ্ট হতে পারে তাদের ভর-সংখ্যা এবং পরমাণবিক সংখ্যা ইউরেনিয়ামের তুলনায় সামান্য কম হবে। অর্থাৎ অবশিষ্ট কেন্দ্রকটি পর্যায় সারণীতে ইউরেনিয়ামের কাছাকাছি অবস্থিত কোন মৌলের পরমাণু কেন্দ্রক হওয়া উচিত। সেজন্য হান্ ও তাঁর সহযোগীগণ প্রথমে মনে করেন যে বেরিয়ামের সমধর্মী নবসৃষ্ট তেজস্ক্রিয় পদার্থটি প্রকৃতপক্ষে বেরিয়াম নয়; সেটি হচ্ছে বেরিয়ামের অনুরূপ রাসায়নিক ধর্ম সম্পন্ন অপেক্ষাকৃত ভারী মৌল রেডিয়ামের ($Z=88$) কোন আইসোটোপ। স্পষ্টতঃ নিউট্রন বর্ষণের ফলে ইউরেনিয়াম কেন্দ্রক থেকে যদি দুটি $\alpha$-কণিকা নিঃসৃত হয় তাহলে একটি রেডিয়াম আইসোটোপ সৃষ্ট হতে পারে।

এর অব্যবহিত পরে হান্ এবং ষ্ট্রাস্‌মান খুব যত্ন সহকারে অনুষ্ঠিত রাসায়নিক পরীক্ষার দ্বারা প্রমাণ করেন যে নব আবিষ্কৃত তেজস্ক্রিয় পদার্থটি হচ্ছে প্রকৃতপক্ষে বেরিয়াম, রেডিয়াম নয়। এর থেকে তাঁরা স্থির সিদ্ধান্তে উপনীত হন যে নিউট্রন বর্ষণের ফলে ইউরেনিয়াম কেন্দ্রক এমন দুটি খণ্ডে বিভাজিত হয় যে তাদের মধ্যে একটি খণ্ড হচ্ছে অপেক্ষাকৃত অনেক কম ভর-সংখ্যা সম্পন্ন বেরিয়াম পরমাণুর কেন্দ্রক। যেহেতু বেরিয়ামের পরমাণবিক সংখ্যা $Z=56$, অতএব এইরূপ বিভাজনের ফলে উৎপন্ন অন্য খণ্ডটির পরমাণবিক সংখ্যা $Z=92-56=36$ হবে। অর্থাৎ সেটি হবে ক্রিপ্‌টন

চিত্র 19·1

ইউরেনিয়াম বিভাজনের মেঘকক্ষ আলোকচিত্র ।

মৌলের পরমাণু কেন্দ্রক। বস্তুতঃ এর অল্প দিনের মধ্যেই এইরূপ ক্ষেত্রে ক্রুপ্‌টনের তেজস্ক্রিয় আইসোটোপ সৃষ্টির নিদর্শন পাওয়া যায়। মাইৎনার এবং ফ্রিশ্‌ (Liese Meitner and O.R. Frisch) এই নব আবিষ্কৃত সংঘটনের নাম দেন 'কেন্দ্রক বিভাজন' (Nuclear Fission)। তাঁদের মতে কেন্দ্রক বিভাজন প্রক্রিয়া হচ্ছে একটি নূতন ধরনের কেন্দ্রক বিক্রিয়া, যার ফলে একটি ভারী কেন্দ্রক সমমাত্রিক ভর সম্পন্ন দুটি কেন্দ্রকে বিভাজিত হয়ে যায়। কেন্দ্রক বিভাজনের ফলে সৃষ্ট কেন্দ্রকগুলিকে বলা হয় বিভাজন-খণ্ড (Fission Fragments)। হান্‌ এবং ষ্ট্রাস্‌মান কর্তৃক অনুষ্ঠিত কেন্দ্রক বিভাজন প্রক্রিয়াকে নিম্নলিখিত সমীকরণ দ্বারা নির্দেশিত করা যায়ঃ

$$_{92}U^{235} + {}_0n^1 \rightarrow {}_{92}U^{236*} \rightarrow {}_{56}Ba + {}_{36}Kr \qquad (19\cdot1)$$

বিভাজন-খণ্ডদ্বয়ের ভর-সংখ্যার অনিশ্চয়তার জন্য (19·1) সমীকরণে এদের ভর-সংখ্যা লেখা হয় নি।

(19·1) চিত্রে ইউরেনিয়াম বিভাজনের ফলে সৃষ্ট দুটি সমমাত্রিক ভর সম্পন্ন বিভাজন-খণ্ডের ভ্রমণপথের (Tracks) মেঘ-কক্ষ আলোকচিত্র প্রদর্শিত হয়েছে। এইরূপ আলোকচিত্র থেকে বিভাজন-খণ্ড দুটির পথসীমা (Range) পরিমাপ করে তাদের গতিশক্তি নির্ণয় করা যায়।

১৯৩৯ সালের গোড়ার দিকে কেন্দ্রক বিভাজন আবিষ্কারের কথা জানা যায়। এর অব্যবহিত পরেই পৃথিবীর বিভিন্ন দেশের গবেষণাগারে অনুষ্ঠিত পরীক্ষার দ্বারা এই আবিষ্কারের সত্যতা সমর্থিত হয়। পরবর্তী দুই বছরের মধ্যে থোরিয়াম ($Z=90$) এবং প্রোটো-অ্যাক্‌টিনিয়াম ($Z=91$) কেন্দ্রকের বিভাজন অনুষ্ঠিত হয়। তাছাড়া আপতিত নিউট্রনের শক্তির উপর কেন্দ্রক বিভাজন প্রক্রিয়ার নির্ভরশীলতা, কেন্দ্রক বিভাজন কালে নিঃসৃত শক্তির পরিমাণ, বিভাজন-খণ্ডগুলির স্বরূপ নির্ণয় ইত্যাদি বিষয় সম্বন্ধে নানারূপ পরীক্ষাও বিভিন্ন গবেষণাগারে অনুষ্ঠিত হয়। কেন্দ্রক বিভাজন প্রক্রিয়ার প্রধান প্রধান বৈশিষ্ট্যগুলি সম্বন্ধে পরবর্তী কয়েকটি অনুচ্ছেদে আলোচনা করা হবে।

## 19·2: কেন্দ্রক বিভাজনের ফলে উদ্ভূত শক্তি

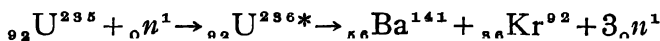
নানাবিধ পরীক্ষার দ্বারা পরিমাপ করে কেন্দ্রক বিভাজনের ফলে উৎপন্ন বিভাজন-খণ্ড দুটির মোট গতিশক্তির মান পাওয়া যায় প্রায় 168 মি-ই-ভো। এই তথ্য থেকে বোঝা যায় যে কেন্দ্রক বিভাজন কালে প্রচণ্ড শক্তির উদ্ভব হয়।

এই শক্তি সাধারণ কেন্দ্রক বিক্রিয়া কালে উদ্ভূত শক্তি ( কয়েক মি-ই-ভো ) অপেক্ষা অনেক উচ্চ হয়। কেন্দ্রক বিভাজন কালে বিভাজন-খণ্ডগুলি ছাড়া কয়েকটি নিউট্রন এবং $\gamma$-রশ্মি নিঃসৃত হয়। উদ্ভূত শক্তির কিছু অংশ এইসব নিউট্রন এবং $\gamma$-রশ্মি ফোটনগুলির মধ্যেও বণ্টিত হয়। তাছাড়া তেজস্ক্রিয় বিভাজন-খণ্ডসমূহ থেকে নিঃসৃত $\beta$-কণিকাগুলির শক্তি এবং $\beta$-বিঘটন কালে নিঃসৃত $\gamma$-রশ্মির শক্তিও মোট উদ্ভূত শক্তির একটা অংশ। এর থেকে বোঝা যায় যে বিভাজন কালে উদ্ভূত মোট শক্তি উপরে প্রদত্ত শক্তির মান অপেক্ষা কিছু বেশী হয়। যদি এক টুকরা ইউরেনিয়মের উপর নিউট্রন বর্ষণ করা যায় তাহলে কেন্দ্রক বিভাজনের সময়ে নিঃসৃত বিভাজন-খণ্ডগুলি এবং অন্যান্য প্রকার বিকিরণ ইউরেনিয়াম টুকরাটির মধ্যে শোষিত হয়। এদের শক্তি টুকরাটির মধ্যে শোষিত হওয়ার ফলে সেটি উত্তপ্ত হয়ে যায়। ক্যালরিমিটারের সাহায্যে এইভাবে উৎপন্ন তাপের পরিমাণ নির্ণয় করলে দেখা যায় যে প্রতিটি ইউরেনিয়াম কেন্দ্রকের বিভাজনের সময় প্রায় 185 মি-ই-ভো শক্তি নিঃসৃত হয়। এখানে উল্লেখযোগ্য যে এই ধরনের পরিমাপের দ্বারা উদ্ভূত শক্তির যে মান পাওয়া যায় তা প্রকৃত মান অপেক্ষা কিছু কম হয়। কারণ $\gamma$-রশ্মি, নিউট্রিনো প্রভৃতি উচ্চ ভেদ্যতা (Penetrability) সম্পন্ন বিকিরণের কিছু অংশ ইউরেনিয়াম খণ্ড থেকে নির্গত হয়ে যায়।

কেন্দ্রক বিভাজনের সময়ে এত অধিক পরিমাণ শক্তি নিঃসরণের কারণ হচ্ছে যে নিউট্রন বর্ষণের ফলে সৃষ্ট ভারী যৌগ-কেন্দ্রকটির ( যথা $U^{236}$ ) পরমাণবিক ভর বিভাজন-খণ্ডগুলির মোট পরমাণবিক ভর অপেক্ষা অনেক বেশী হয়। (16·7) অনুচ্ছেদে দেখা গেছে যে ইউরেনিয়াম প্রভৃতি সর্বাপেক্ষা গুরুভার কেন্দ্রকগুলির ক্ষেত্রে নিউক্লীয়ন প্রতি বন্ধন-শক্তি, অর্থাৎ বন্ধন-ভগ্নাংশ (Binding Fraction) প্রায় 7·5 মি-ই-ভো হয় (16·9 চিত্র দ্রষ্টব্য )। অপরপক্ষে পর্যায় সারণীর মাঝামাঝি অবস্থিত কেন্দ্রকগুলির ক্ষেত্রে বন্ধন-ভগ্নাংশ প্রায় 8·5 মি-ই-ভো হয়। কেন্দ্রক বিভাজনের ফলে সৃষ্ট বিভাজন-খণ্ডগুলি পর্যায় সারণীর মাঝামাঝি অবস্থিত থাকে। সুতরাং বিভাজনের ফলে উৎপন্ন শক্তি নিউক্লীয়ন প্রতি প্রায় এক মি-ই-ভো হয়। সুতরাং মোট উদ্ভূত শক্তি প্রায় 200 মি-ই-ভো হয়।

কেন্দ্রক বিভাজনে অংশ গ্রহণকারী বিভিন্ন আইসোটোপের পরমাণবিক ভর থেকে মোট উদ্ভূত শক্তি নির্ণয় করা যায়। উদাহরণস্বরূপ $U^{235}$

আইসোটোপের উপর নিউট্রন বর্ষণের ফলে অনুষ্ঠিত কেন্দ্রক বিভাজন প্রক্রিয়াটির কথা বিবেচনা করা যাক। যদি বিভাজন-খণ্ড দুটি $Ba^{141}$ ও $Kr^{92}$ হয় এবং বিভাজন কালে মোট তিনটি নিউট্রন নিঃসৃত হয়, তাহলে আমরা লিখতে পারি

$$_{92}U^{235} + {}_0n^1 \rightarrow {}_{92}U^{236*} \rightarrow {}_{56}Ba^{141} + {}_{36}Kr^{92} + 3\,{}_0n^1$$

ভর-শক্তি সমতা সূত্র প্রয়োগ করে এক্ষেত্রে বিভাজন শক্তির মান পাওয়া যায় ঃ

$$Q = M(U^{235}) + M_n - M(Ba^{141}) - M(Kr^{92}) - 3M_n$$
$$= 235{\cdot}1175 + 1{\cdot}00898 - 140{\cdot}9577 - 91{\cdot}9264 - 3 \times 1{\cdot}00898$$
$$= 0{\cdot}2154\ amu$$
$$= 200{\cdot}6 \text{ মি-ই-ভো}$$

অর্থাৎ প্রত্যেকটি কেন্দ্রক বিভাজনের ফলে প্রায় 200 মি-ই-ভো শক্তি উদ্ভূত হয়।

কেন্দ্রক বিভাজনের ক্ষেত্রে $Q$-সংখ্যার এই বিশালত্বের জন্য অল্প পরিমাণ ইউরেনিয়াম বিভাজন করে প্রচুর পরিমাণ শক্তি উৎপাদন করা সম্ভব। উদাহরণ-স্বরূপ এক গ্রাম $U^{235}$ সম্পূর্ণ বিভাজিত হলে যে পরিমাণ শক্তি উদ্ভূত হবে তা নির্ণয় করা যেতে পারে। এক গ্রাম $U^{235}$ আইসোটোপের মধ্যে কেন্দ্রকের সংখ্যা হচ্ছে

$$n = \frac{6{\cdot}025 \times 10^{23}}{235} = 2{\cdot}56 \times 10^{21}$$

সুতরাং এক গ্রাম $U^{235}$ সম্পূর্ণ গাজিত হওয়ার ফলে মোট উদ্ভূত শক্তি হবে

$$E = nQ = 2{\cdot}56 \times 10^{21} \times 200{\cdot}6 \times 1{\cdot}6 \times 10^{-6} \text{ আর্গ}$$
$$= \frac{2{\cdot}56 \times 200{\cdot}6 \times 1{\cdot}6 \times 10^{15}}{10^7 \times 10^3 \times 3600} \text{ কিলোওয়াট-ঘণ্টা}$$
$$= 2{\cdot}28 \times 10^4 \text{ kwh}$$

একটি সাধারণ বৈদ্যুতিক শক্তি উৎপাদক (Generator) যন্ত্র, যার ক্ষমতা এক মেগাওয়াট ( বা $10^3$ কিলোওয়াট ), তার থেকে এই পরিমাণ শক্তি পেতে হলে যন্ত্রটিকে মোট 22·8 ঘণ্টা বা প্রায় একদিন কাজ করতে হবে।

এই শক্তি কয়লা পুড়িয়ে উৎপন্ন করার জন্য যে পরিমাণ কয়লা লাগে তা

সহজেই নির্ণয় করা যায়। যেহেতু প্রতি কার্বন পরমাণুর সংগে দুটি অক্সিজেন পরমাণুর রাসায়নিক সংযোজনের ফলে একটি $CO_2$ অণু উৎপন্ন করার সময়ে মোট 4 ই-ভো শক্তি নিঃসৃত হয়, অতএব এক গ্রাম কার্বন সম্পূর্ণ ভস্মীভূত হলে মোট উৎপন্ন শক্তি হবে

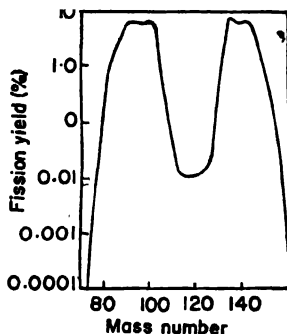
$$\varepsilon = \frac{4\times1{\cdot}6\times10^{-12}}{10^{7}\times10^{3}\times3600}\times\frac{6{\cdot}025\times10^{2}}{12}$$
$$=8{\cdot}92\times10^{-3}\ \text{kwh}$$

সুতরাং প্রয়োজনীয় কার্বনের পরিমাণ হবে

$$m=\frac{2{\cdot}28\times10^{4}}{8{\cdot}92\times10^{-3}}=2{\cdot}56\times10^{6}\ \text{গ্রাম}=2{\cdot}56\ \text{মেট্রিক-টন}$$

অর্থাৎ এক গ্রাম $U^{235}$ সম্পূর্ণ বিভাজিত হলে যে পরিমাণ শক্তি উৎপন্ন হয়, তা পেতে হলে 2·56 মেট্রিক-টন কার্বনকে ভস্মীভূত করা প্রয়োজন। এর থেকে জ্বালানী হিসাবে ইউরেনিয়াম ব্যবহারের সমধিক সুবিধা সহজেই প্রতীয়মান হয়।

## 19·3 : বিভাজন-খণ্ডগুলির প্রকৃতি

ইউরেনিয়াম বা অনুরূপ ভারী মৌলের কেন্দ্রক বিভাজনের ফলে সমমাত্রিক ভর সম্পন্ন দুটি বিভাজন-খণ্ড উৎপন্ন হয়। পরীক্ষার দ্বারা দেখা যায় যে

চিত্র 19·2
তাপীয় নিউট্রন দ্বারা $U^{235}$ বিভাজনের ক্ষেত্রে বিভাজন খণ্ডের শতকরা উৎপাদন লেখচিত্র।

বিভাজন-খণ্ডগুলির ভর-সংখ্যার (Mass Number) কিছুটা বিস্তৃতি থাকে। সাধারণতঃ একটি খণ্ড অন্যটি অপেক্ষা হালকা হয়। $U^{235}$ কেন্দ্রকের বিভাজনের সময় হালকা খণ্ডের ভর-সংখ্যা প্রায় 85 থেকে 105 সীমার মধ্যে

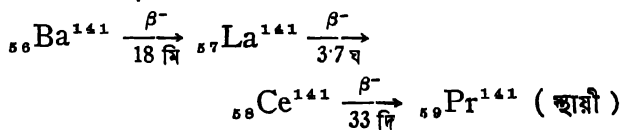
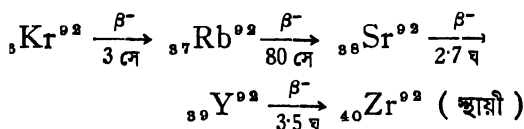
বিস্তৃত থাকে। অপর পক্ষে ভারী খণ্ডের ভর-সংখ্যা প্রায় 130 থেকে 150 সীমার মধ্যে বিস্তৃত থাকে। বিভিন্ন ভর-সংখ্যা সম্পন্ন বিভাজন-খণ্ডের শতকরা উৎপাদনের (Percentage Yield) লেখচিত্র (19·2) চিত্রে প্রদর্শিত হয়েছে। লেখচিত্র থেকে দেখা যায় যে 95 এবং 139 ভর-সংখ্যা সম্পন্ন বিভাজন-খণ্ড উৎপাদনের সম্ভাব্যতা সর্বাধিক। এখানে ধরা হয়েছে যে এইরূপ বিভাজন কালে দুটি সমকালীন (Prompt) নিউট্রনও নিঃসৃত হয়। লেখচিত্র থেকে আরও দেখা যায় যে 117 ভর-সংখ্যা সম্পন্ন বিভাজন-খণ্ড উৎপাদনের সম্ভাব্যতা ন্যূনতম হয়; অর্থাৎ দুটি সমান ভর সম্পন্ন বিভাজন-খণ্ড উৎপন্ন হওয়ার সম্ভাব্যতা খুবই কম হয়।

বিভাজন-খণ্ডগুলির মধ্যে সাধারণতঃ খুব বেশী নিউট্রন-আধিক্য ( Neutron Excess ) দেখা যায়। উদাহরণস্বরূপ বিভাজনের সময়ে উৎপন্ন $Ba^{141}$ এবং $Kr^{92}$ কেন্দ্রক দুটির কথা বিবেচনা করা যাক। এদের নিউট্রন-আধিক্য ( অর্থাৎ নিউট্রন এবং প্রোটন সংখ্যার ব্যবধান ) যথাক্রমে $N-Z=A-2Z=141-112=29$ এবং $N-Z=A-2Z=92-72=20$ হয়। এখন প্রাকৃতিক বেরিয়ামের ( $Z=56$ ) এবং ক্রিপ্‌টনের ( $Z=36$ ) যথাক্রমে সাতটি এবং ছয়টি স্থায়ী আইসোটোপ আছে। এদের মধ্যে সর্বাপেক্ষা গুরুভার আইসোটোপ দুটি হচ্ছে যথাক্রমে $Ba^{138}$ ($N-Z=26$ ) এবং $Kr^{86}$ ($N-Z=14$)। অর্থাৎ স্থায়ী হতে হলে বেরিয়াম বা ক্রিপ্‌টনের কেন্দ্রকে নিউট্রন-আধিক্যের যে সর্বোচ্চ মান সম্ভব হতে পারে, উপরোক্ত বিভাজন-খণ্ড দুটিতে নিউট্রন-আধিক্যের মান তার চেয়ে অনেক বেশী হয়। (16·12) অনুচ্ছেদে আমরা দেখেছি যে এই জাতীয় কেন্দ্রক স্থায়ী হতে পারে না, এরা $\beta^-$ বিঘটনশীল হয়। সেইজন্য বিভাজন-খণ্ডগুলি $\beta^-$ কণিকা নিঃসৃত করে বিঘটিত হয়। সাধারণতঃ এইরূপ বিঘটনের ফলে সৃষ্ট অবশিষ্ট কেন্দ্রকের মধ্যেও নিউট্রন-আধিক্য স্থায়িত্বের জন্য প্রয়োজনীয় মান অপেক্ষা বেশী হয়। ফলে সেগুলিও $\beta^-$ বিঘটনশীল হয়। এইভাবে কয়েকবার ক্রমায়ত $\beta^-$ বিঘটনের ফলে অবশেষে একটি স্থায়ী অবশিষ্ট কেন্দ্রক সৃষ্ট হয়। উদাহরণস্বরূপ $Ba^{141}$ এবং $Kr^{92}$ কেন্দ্রক দুটির ক্রমায়ত $\beta^-$ বিঘটন নিম্নলিখিত সমীকরণ দুটির দ্বারা নির্দেশিত করা যায়ঃ

$$_{56}Ba^{141} \xrightarrow[18\text{ মি}]{\beta^-} {}_{57}La^{141} \xrightarrow[3\cdot7\text{ ঘ}]{\beta^-}$$

$$_{58}Ce^{141} \xrightarrow[33\text{ দি}]{\beta^-} {}_{59}Pr^{141} \quad (\text{স্থায়ী})$$

$$ {}_{36}\mathrm{Kr}^{92} \xrightarrow[3\ \text{সে}]{\beta^-} {}_{37}\mathrm{Rb}^{92} \xrightarrow[80\ \text{সে}]{\beta^-} {}_{38}\mathrm{Sr}^{92} \xrightarrow[2\cdot7\ \text{ঘ}]{\beta^-} $$

$$ {}_{39}\mathrm{Y}^{92} \xrightarrow[3\cdot5\ \text{ঘ}]{\beta^-} {}_{40}\mathrm{Zr}^{92}\ (\text{স্থায়ী}) $$

এই $\beta^-$ বিঘটন-শৃংখল (Disintegration Chain) দুটির শেষ স্থায়ী কেন্দ্রক দুটি যথাক্রমে $\mathrm{Pr}^{141}$ এবং $\mathrm{Zr}^{92}$ হয়।

এখানে উল্লেখযোগ্য যে (19·1) অনুচ্ছেদে আলোচিত কুরী এবং সাভিচের পরীক্ষায় তাঁরা যে তেজস্ক্রিয় ল্যান্থানামের ( $Z=57$ ) নিদর্শন পেয়েছিলেন তা প্রকৃতপক্ষে বিভাজন-খণ্ড বেরিয়ামের $\beta^-$ বিঘটনের ফলে উৎপন্ন হয়।

বিভাজন-খণ্ডগুলির মধ্যে অতিরিক্ত নিউট্রন-আধিক্যের কারণ সহজেই ব্যাখ্যা করা যায়। (16·12) অনুচ্ছেদে দেখা গেছে যে স্থায়ী কেন্দ্রকের নিউট্রন-আধিক্য কেন্দ্রকের ভরের সংগে বৃদ্ধি পায়। সর্বাপেক্ষা গুরুভার প্রাকৃতিক মৌল ইউরেনিয়ামের $\mathrm{U}^{235}$ এবং $\mathrm{U}^{238}$ আইসোটোপ দুটির নিউট্রন-আধিক্যের মান যথাক্রমে 51 এবং 54 হয়। অপরপক্ষে পর্যায় সারণীর মধ্যাঞ্চলে অবস্থিত স্থায়ী কেন্দ্রকসমূহের নিউট্রন-আধিক্য অনেক কম হয়। উপরে প্রদত্ত উদাহরণে বেরিয়াম এবং ক্রিপ্‌টনের সর্বাপেক্ষা ভারী স্থায়ী আইসোটোপ দুটির ($\mathrm{Ba}^{138}$ এবং $\mathrm{Kr}^{86}$) নিউট্রন-আধিক্যের সমষ্টি মাত্র 40 হয়। স্পষ্টতঃ আপতিত নিউট্রন শোষণ করে $\mathrm{U}^{235}$ কেন্দ্রক যখন বিভাজিত হয় তখন সৃষ্ট বিভাজন-খণ্ডগুলির মধ্যে তাদের স্থায়িত্বের পক্ষে অপ্রয়োজনীয় বহু সংখ্যক অতিরিক্ত নিউট্রন থেকে যায়।

### 19·4 : কেন্দ্রক বিভাজনের সময় নিউট্রন নিঃসরণ

পূর্ববর্তী অনুচ্ছেদের আলোচনা থেকে দেখা যায় যে একটি ভারী কেন্দ্রক বিভাজনের ফলে বেশ কিছু সংখ্যক অতিরিক্ত নিউট্রন থেকে যায়। এদের মধ্যে কয়েকটি বিভাজনের সময়ে 'সমকালীন নিউট্রন' (Prompt Neutron) হিসাবে নিঃসৃত হয়। এই নিউট্রনগুলি বিভাজনের পর $10^{-14}$ সেকেণ্ডের মধ্যে নিঃসৃত হয়। $\mathrm{U}^{235}$ বিভাজনের সময় গড়ে প্রায় 2·5 সমকালীন নিউট্রন নিঃসৃত হয়। ইউরেনিয়ামোত্তর প্লুটোনিয়াম মৌলের ($Z=94$) আইসোটোপ $\mathrm{Pu}^{239}$ বিভাজনের সময় গড়ে প্রায় তিনটি সমকালীন নিউট্রন নিঃসৃত হয়। এইসব নিউট্রন সাধারণতঃ প্রায় 0·05 মি-ই-ভো থেকে 17 মি-ই-ভো পর্যন্ত শক্তি সহকারে নিঃসৃত হয়। এই সীমার মধ্যে এদের

শক্তি বণ্টন কতকটা ম্যাক্সওয়েলীয় বণ্টন সূত্রের (Maxwellian Distribution Law) অনুরূপ হয়। নিঃসৃত নিউট্রনের গড়শক্তি প্রায় 2 মি-ই-ভো হয়।

ব্যবহারিক প্রয়োজনে কেন্দ্রকীয় ( বা পরমাণবিক ) শক্তি উৎপাদনের পরিপ্রেক্ষিতে বিভাজন কালে সমকালীন নিউট্রন নিঃসরণের গুরুত্ব অপরিসীম। এ সম্বন্ধে ( 19·8 ) অনুচ্ছেদে বিস্তারিত আলোচনা করা হবে।

## 19·5 : বিভাজন প্রক্রিয়ার উপর আপতিত নিউট্রনের শক্তির প্রভাব

পরীক্ষার দ্বারা দেখা গেছে যে $U^{235}$, $Pu^{239}$ প্রভৃতি জোড়-বিজোড় জাতীয় কেন্দ্রক মন্থরগতি (Slow) বা তাপীয় নিউট্রনের (Thermal Neutrons) দ্বারা সহজেই বিভাজিত হয়। বস্তুতঃ এই জাতীয় কেন্দ্রকগুলির ক্ষেত্রে তাপীয় নিউট্রন দ্বারা বিভাজনের প্রস্থচ্ছেদ (Cross Section), অর্থাৎ সম্ভাব্যতা, উচ্চশক্তি নিউট্রন দ্বারা বিভাজনের প্রস্থচ্ছেদ অপেক্ষা অনেক বেশী হয়। $U^{235}$ এবং $Pu^{239}$ কেন্দ্রকদ্বয়ের ক্ষেত্রে তাপীয় নিউট্রন বিভাজন প্রস্থচ্ছেদের মান যথাক্রমে 580 এবং 750 বার্ন হয়। অপরপক্ষে উচ্চশক্তি ( 2 মি-ই-ভো ) নিউট্রন দ্বারা বিভাজনের প্রস্থচ্ছেদ $U^{235}$ এর ক্ষেত্রে মাত্র 1·27 বার্ন হয়। $Pu^{239}$ এর ক্ষেত্রেও এই প্রস্থচ্ছেদের মান অনুরূপ মাত্রার হয়। এখানে উল্লেখযোগ্য যে কেবল জোড়-বিজোড় (Even-Odd) জাতীয় কেন্দ্রকগুলিই তাপীয় নিউট্রনের দ্বারা বিভাজিত হতে পারে।

অপরপক্ষে $U^{238}$, $Th^{232}$ প্রভৃতি জোড়-জোড় (Even-Even) জাতীয় কেন্দ্রক কেবল উচ্চশক্তি ( কয়েক মি-ই-ভো ) নিউট্রন দ্বারা বিভাজিত হতে পারে। এইসব কেন্দ্রকের ক্ষেত্রে তাপীয় নিউট্রন দ্বারা বিভাজন সম্ভব হয় না। উচ্চশক্তি নিউট্রন দ্বারা $U^{238}$ কেন্দ্রক বিভাজনের প্রস্থচ্ছেদ 0·5 বার্ন হয়।

উপরোক্ত তথ্যগুলি বেথে-ভাইস্‌ৎজ্যাকের (Bethe-Weiszäcker) ভর-ফর্মুলার সাহায্যে ব্যাখ্যা করা যায়। ( 16·32 ) সমীকরণে প্রদত্ত এই ফর্মুলার শেষ অর্থাৎ $\delta$ পদটির মান নির্ভর করে কেন্দ্রকের প্রোটন এবং নিউট্রন সংখ্যার ($Z$ এবং $N$) মান জোড় না বিজোড় তার উপর। জোড়-জোড় শ্রেণীর ক্ষেত্রে $\delta$-পদটি ধনাত্মক হয়, এবং এই শ্রেণীর কেন্দ্রক সর্বাপেক্ষা দৃঢ় সংবদ্ধ হয়। এক্ষেত্রে ভর-ফর্মুলায় $\delta$-পদটি বিযুক্ত হয়। জোড়-বিজোড় বা বিজোড়-জোড় শ্রেণীর ক্ষেত্রে $\delta$ প্রায় শূন্য হয়। এই শ্রেণীর কেন্দ্রক

অপেক্ষাকৃত কম দৃঢ় সংবদ্ধ হয়। এক্ষেত্রে ভর-ফর্মুলায় $\delta$-পদটি থাকে না। বিজোড়-জোড় শ্রেণীর ক্ষেত্রে $\delta$ ঋণাত্মক হয় এবং এইরূপ কেন্দ্রক সর্বাপেক্ষা কম দৃঢ় সংবদ্ধ হয়। এক্ষেত্রে ভর-ফর্মুলায় $\delta$-পদটি যুক্ত হয়।

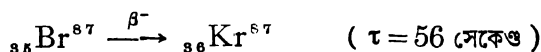
এখন $Z$ পরমাণবিক সংখ্যা সম্পন্ন একটি কেন্দ্রক $X^A$ যদি $E_k$ গতিশক্তি সম্পন্ন নিউট্রন শোষণের ফলে $C^{A+1*}$ যৌগ-কেন্দ্রক (Compound Nucleus) উৎপন্ন করে, তাহলে যৌগ-কেন্দ্রকটির উত্তেজনা-শক্তি (Excitation Energy) হয়

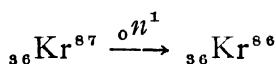
$$E_c = M(X) + M_n - M(C) + E_k = E_b + E_k \qquad (19{\cdot}2)$$

এখানে $E_b = M(X) + M_n - M(C)$ হচ্ছে যৌগ-কেন্দ্রকের মধ্যে একটি নিউট্রনের বন্ধন-শক্তি। আপতিত নিউট্রনের গতিশক্তি শূন্য হলে, অর্থাৎ $E_k = 0$ হলে, $E_c = E_b$ হয়। X-কেন্দ্রকটি যদি জোড়-বিজোড় হয় ( যথা $U^{235}$ বা $Pu^{239}$) তাহলে উৎপন্ন যৌগ-কেন্দ্রক C জোড়-জোড় হবে ( যথা $U^{236}$ বা $Pu^{240}$ )। সুতরাং ( 19·2 ) সমীকরণে $M(X)$ পদে $\delta$ শূন্য হবে এবং $M(C)$ পদে $\delta$ ঋণাত্মক হবে। যেহেতু (19·2) সমীকরণে $M(C)$ পদটি বিয়োগ করা হয় স্পষ্টতঃ উপরের সমীকরণে একটি $\delta$ পদ যুক্ত হবে, যার ফলে এক্ষেত্রে উত্তেজনা-শক্তি ($E_c$) অপেক্ষকৃত বেশী হবে। অপরপক্ষে X যদি জোড়-জোড় হয় ( যথা $U^{238}$ বা $Th^{232}$ ), তাহলে যৌগ-কেন্দ্রক C জোড়-বিজোড় হবে ( যথা $U^{239}$ বা $Th^{233}$ )। ফলে ( 19·2 ) সমীকরণ থেকে একটি $\delta$-পদ বিযুক্ত হবে ; সেজন্য এক্ষেত্রে উৎপন্ন যৌগ-কেন্দ্রকের উত্তেজনা শক্তি ($E_c$) অপেক্ষাকৃত কম হবে। ( 19·7 ) অনুচ্ছেদে প্রদত্ত আলোচনা থেকে আমরা দেখব যে কেন্দ্রক বিভাজন অনুষ্ঠিত করার জন্য যৌগ-কেন্দ্রকটির উত্তেজনা শক্তির একটা ন্যূনতম মান থাকা প্রয়োজন। জোড়-বিজোড় কেন্দ্রকের ক্ষেত্রে প্রায় শূন্য শক্তি সম্পন্ন তাপীয় নিউট্রন শোষণের ফলে সৃষ্ট যৌগ-কেন্দ্রকের উত্তেজনা শক্তি এই ন্যূনতম প্রয়োজনীয় শক্তি অপেক্ষা উচ্চতর হয়। সেইজন্য এই শ্রেণীর কেন্দ্রকসমূহ তাপীয় নিউট্রন দ্বারাই বিভাজিত হতে পারে। অপরপক্ষে জোড়-জোড় কেন্দ্রকের ক্ষেত্রে তাপীয় নিউট্রন শোষণের ফলে সৃষ্ট যৌগ-কেন্দ্রকের উত্তেজনা শক্তি প্রয়োজনীয় ন্যূনতম শক্তি অপেক্ষা কম হয়। ফলে এই শ্রেণীর কেন্দ্রকসমূহ তাপীয় নিউট্রন দ্বারা বিভাজিত হয় না। আপতিত নিউট্রনের একটা ন্যূনতম গতিশক্তি থাকলে তবেই সৃষ্ট যৌগ-কেন্দ্রকের উত্তেজনা শক্তি বিভাজনের জন্য প্রয়োজনীয় ন্যূনতম শক্তির সমান হতে পারে।

## 19·6 : বিলম্বিত নিউট্রন নিঃসরণ

বিভাজনের সময়ে কয়েকটি সমকালীন নিউট্রন নিঃসরণের কথা ইতিপূর্বে আলোচনা করা হয়েছে। এছাড়া বিভাজনের পরে কয়েক মিনিট পর্যন্ত অতিরিক্ত নিউট্রন নিঃসরণের নিদর্শন পাওয়া যায়। এই সব নিউট্রনকে বিলম্বিত নিউট্রন (Delayed Neutrons) বলা হয়। মোট নিঃসৃত নিউট্রনের প্রায় 0·75% বিলম্বিত নিউট্রন হিসাবে নিঃসৃত হয়। সময়ের সংগে এদের নিঃসরণের হার সূচক-সূত্র (Exponential Law) অনুযায়ী হ্রাস পায়। $U^{235}$ বিভাজনের ক্ষেত্রে বিলম্বিত নিউট্রন নিঃসরণের অর্ধজীবনকাল 0·05 সেকেণ্ড থেকে 56 সেকেণ্ড পর্যন্ত পাওয়া যায়। শেষোক্ত ক্ষেত্রে বিলম্বিত নিউট্রন নিঃসরণ ঘটে ব্রোমিনের $Br^{87}$ আইসোটোপ থেকে। বিভাজন-খণ্ড হিসাবে সৃষ্ট এই আইসোটোপটি $\beta$-বিঘটনশীল হয়ঃ

$$_{35}Br^{87} \xrightarrow{\beta^-} {}_{36}Kr^{87} \qquad (\tau = 56 \text{ সেকেণ্ড})$$

উৎপন্ন হওয়ার সংগে সংগে $Kr^{87}$ একটি নিউট্রন নিঃসৃত করে $Kr^{86}$ আইসোটোপে রূপান্তরিত হয়ঃ

$$_{36}Kr^{87} \xrightarrow{_0n^1} {}_{36}Kr^{86}$$

এক্ষেত্রে উল্লেখযোগ্য যে $Kr^{87}$ কেন্দ্রকে নিউট্রন সংখ্যা 51 হয়। একটি নিউট্রন নিঃসরণের ফলে সৃষ্ট $Kr^{86}$ কেন্দ্রকে নিউট্রন সংখ্যা কমে গিয়ে 'ম্যাজিক-সংখ্যা' 50 হয়ে যায় (16·15 অনুচ্ছেদ দ্রষ্টব্য)। অর্থাৎ $Kr^{86}$ কেন্দ্রকে 50টি নিউট্রন কয়েকটি পূর্ণ খোলসে দৃঢ়ভাবে আবদ্ধ থাকে। সেজন্য পরবর্তী $Kr^{87}$ আইসোটোপে এক পঞ্চাশতম নিউট্রনটি আর আবদ্ধ হতে পারে না। অর্থাৎ $Br^{87}$ এর $\beta^-$ বিঘটনের ফলে সৃষ্ট $Kr^{87}$ কেন্দ্রক সৃষ্টির সংগে সংগেই অতিরিক্ত নিউট্রনটি পরিত্যাগ করে দৃঢ় সংবদ্ধ $Kr^{86}$ কেন্দ্রকে রূপান্তরিত হয়।

পরমাণবিক শক্তি নিঃসারক চুল্লী বা বিক্রিয়ক (Reactor) নিয়ন্ত্রণের ব্যাপারে উপরোক্ত বিলম্বিত নিউট্রন নিঃসরণের ভূমিকা বিশেষ গুরুত্বপূর্ণ।

## 19·7 : বোর-হুইলার বিভাজন তত্ত্ব

কেন্দ্রক বিভাজন কী ভাবে ঘটে তা ব্যাখ্যা করার জন্য বোর এবং হুইলার (Niels Bohr and J. A. Wheeler) কেন্দ্রকের তরল বিন্দু প্রতিরূপের

(Liquid Drop Model) ভিত্তিতে একটি তত্ত্ব উদ্‌ভাবিত করেন। (16·14) অনুচ্ছেদে তরল বিন্দু প্রতিরূপ সম্বন্ধে সংক্ষেপে আলোচনা করা হয়েছে। কেন্দ্রক মধ্যস্থ নিউট্রন প্রোটনগুলির মধ্যে দুই প্রকার বিপরীতমুখী বল ক্রিয়া করে। এদের মধ্যে এক প্রকার বল হচ্ছে বিনিময় (Exchange) জাতীয় আকর্ষণী বল। অন্য প্রকার বল হচ্ছে প্রোটনগুলির মধ্যে ক্রিয়াশীল কুলম্ব বিকর্ষণী বল। আকর্ষণী বলের প্রভাবে কেন্দ্রকটির আকার একটি গোলকাকৃতি তরল বিন্দুর মত হয়ে যায়। প্রোটনগুলির ধনাত্মক আধানের জন্য অবশ্য গোলকটি তাড়িতাহিত হয়। সাধারণতঃ একটি তরল বিন্দু পৃষ্ঠটানের (Surface Tension) জন্য সাম্যাবস্থায় (Equilibrium Condition) গোলকাকৃতি হয়; কারণ গোলকাকৃতি বিন্দুর উপরিতলের ক্ষেত্রফল ন্যূনতম হয়, যার ফলে এর পৃষ্ঠটান জনিত শক্তিও ন্যূনতম হয়। অপরপক্ষে তরল বিন্দুটি যদি আহিত হয়, তাহলে এর কিছুটা কুলম্ব শক্তিও থাকে। বিন্দুটির বিভিন্ন অংশের মধ্যেকার দূরত্ব যত বৃদ্ধি পায়, এই শক্তির মান তত হ্রাস পায়। অর্থাৎ বিন্দুটি গোলকাকৃতি না হয়ে উপগোলকাকৃতি (Ellipsoidal) হলে এর কুলম্ব শক্তি কমে যায়। আহিত বিন্দুর মোট শক্তি এর পৃষ্ঠটান জনিত শক্তি এবং কুলম্ব শক্তির সমষ্টির সমান। বিন্দুটির যে আকৃতিতে এই মোট শক্তি ন্যূনতম হয় সেইটিই হবে এর সাম্যাকৃতি (Equilibrium Shape)। আধানের পরিমাণ খুব বেশী হলে কুলম্ব শক্তির প্রভাব পৃষ্ঠটান শক্তির তুলনায় বৃদ্ধি পায়। ফলে এক্ষেত্রে বিন্দুটির সাম্যাকৃতি গোলক না হতে পারে।

ভারী কেন্দ্রকের ক্ষেত্রেও অবস্থা প্রায় একই রকম হয়। প্রোটন সংখ্যার আধিক্যের জন্য এইরূপ কেন্দ্রক উচ্চ তাড়িতাহিত তরল বিন্দুর মত আচরণ করে। এইরূপ কেন্দ্রকের গোলক সদৃশ সাম্যাকৃতি সহজেই বিকৃত হতে পারে। বাইরে থেকে অল্প পরিমাণ শক্তি সরবরাহ করলেই এইরূপ বিকৃতি ঘটে। একটি ভারী কেন্দ্রক ( যথা $U^{235}$ ) যখন একটি নিউট্রন শোষণ করে তখন সৃষ্ট যৌগ-কেন্দ্রকটি কিছু উত্তেজনা শক্তি (Excitation Energy) $E_c$ পায়, যার পরিমাণ যৌগ-কেন্দ্রকের মধ্যে একটি নিউট্রনের বন্ধন-শক্তি এবং আপতিত নিউট্রনের গতিশক্তির সমষ্টির সমান হয়। ( 19·2 সমীকরণ দ্রষ্টব্য )। এই শক্তির প্রভাবে আহিত তরল বিন্দু সদৃশ কেন্দ্রকটির আকারে বিকৃতি ঘটে, যার ফলে এর আকারের পুনঃ পুনঃ পরিবর্তন ঘটতে থাকে। অর্থাৎ এর আকার স্পন্দিত হতে থাকে। শক্তি যথেষ্ট উচ্চ হলে এইরূপ

স্পন্দনের (Vibration) বিস্তার (Amplitude) এত অধিক হয় যে কেন্দ্রকটি অবশেষে দ্বিখণ্ডিত হয়ে যায় ( 19·3 চিত্র দ্রষ্টব্য )। যে ন্যূনতম

চিত্র 19·3

তরলবিন্দু প্রতিরূপের সাহায্যে কেন্দ্রক বিভাজন পদ্ধতির ব্যাখ্যা।

পরিমাণ শক্তি সরবরাহ করলে কেন্দ্রকটি এইভাবে বিভাজিত হতে পারে তাকে বলা হয় বিভাজনের সূচনা শক্তি (Threshold Energy)। বোর এবং হুইলার উদ্ভাবিত তত্ত্বের সাহায্যে বিভিন্ন ভারী কেন্দ্রকের সূচনা শক্তি ($E_f$) নির্ণয় করা যায়। স্পষ্টতঃ বিভাজন তখনই সম্ভব হয় যখন $E_c > E_f$ হয়। ( 19·1 ) সারণীতে কয়েকটি ভারী কেন্দ্রকের ক্ষেত্রে যৌগ-কেন্দ্রকের মধ্যে নিউট্রনের বন্ধন শক্তি $E_b$ (যা যৌগ-কেন্দ্রকের ন্যূনতম উত্তেজনা শক্তির সমান ) এবং $E_f$ সংখ্যা দুটির মান লিপিবদ্ধ করা হয়েছে ঃ

**সারণী 19·1**

| আদি কেন্দ্রক | যৌগ-কেন্দ্রক | $E_b$ ( মি-ই-ভো ) | $E_f$ ( মি-ই-ভো ) |
|---|---|---|---|
| $Th^{232}$ | $Th^{233}$ | 5·2 | 6·9 |
| $U^{238}$ | $U^{239}$ | 5·2 | 5·9 |
| $U^{235}$ | $U^{236}$ | 6·4 | 5·3 |
| $Pu^{239}$ | $Pu^{240}$ | 6·6 | 5·0 |

উপরের সারণী থেকে প্রতীয়মান হয় যে $U^{235}$ এবং $Pu^{239}$ কেন্দ্রক দুটির ক্ষেত্রে যৌগ-কেন্দ্রকের ন্যূনতম উত্তেজনা শক্তি ($E_b$) বিভাজনের সূচনা শক্তি $E_f$ অপেক্ষা বেশী হয় ; সুতরাং এদের ক্ষেত্রে তাপীয় নিউট্রন দ্বারাই বিভাজন অনুষ্ঠিত করা সম্ভব। অপরপক্ষে $U^{238}$ কেন্দ্রকের ক্ষেত্রে বিভাজন অনুষ্ঠিত করার জন্য আপতিত নিউট্রনের ন্যূনতম গতিশক্তি $E_k = E_b - E_f =$

$5 \cdot 9 - 5 \cdot 2 = 0 \cdot 7$ মি-ই-ভো হওয়া প্রয়োজন। $Th^{232}$ কেন্দ্রকের ক্ষেত্রে এই শক্তি অন্ততঃ 1·7 মি-ই-ভো হতে হবে।

বোর হুইলার তত্ত্ব থেকে আরও দেখা যায় যে কেন্দ্রক যখন খুব ভারী হয় এবং এর আধান অত্যধিক উচ্চ হয়, তখন এর সাম্যাকৃতি গোলক না হয়ে উপগোলক ধরনের হয়। সৃষ্টির সংগে সংগেই এইরূপ কেন্দ্রকের আকার-স্পন্দন হতে থাকে, যার ফলে সেটি তৎক্ষণাৎ স্বতঃস্ফূর্ত ভাবে বিভাজিত হয়ে যায়। বোর এবং হুইলার প্রতিপন্ন করেন যে যখন $Z^2/A > 45$ হয়, তখন এইরূপ স্বতঃস্ফূর্ত বিভাজন (Spontaneous Fission) ঘটে। এখানে $Z$ হচ্ছে পরমাণবিক সংখ্যা (Atomic Number) এবং $A$ হচ্ছে ভর-সংখ্যা (Mass Number)। যে সব কেন্দ্রকের ক্ষেত্রে $Z^2/A$ অনুপাতটি 45 অপেক্ষা অধিক হয়, সাধারণতঃ প্রকৃতিতে সেইরূপ কোন কেন্দ্রকের অস্তিত্ব থাকতে পারে না। এই ভাবে কেন্দ্রকের স্থায়িত্ব-সীমা (Limit of Nuclear Stability) নির্ধারিত হয়। সর্বাপেক্ষা ভারী প্রাকৃতিক মৌল ইউরেনিয়ামের ($U^{238}$) ক্ষেত্রে $Z^2/A = 36$ হয়। এই মান $Z^2/A$ সংখ্যাটির স্থায়িত্ব সীমা নির্ধারক উচ্চতম মান 45 অপেক্ষা কিছু কম। এখানে উল্লেখযোগ্য যে যদিও উপরের আলোচনা অনুযায়ী $U^{238}$ বা অন্যান্য ভারী প্রকৃতিক মৌলের স্বতঃস্ফূর্তভাবে বিভাজিত হওয়া উচিত নয়, প্রকৃতপক্ষে কিন্তু আধুনিক কোয়ানটাম বলবিদ্যা (Quantum Mechanics) অনুযায়ী এইসব ভারী মৌলের স্বতঃস্ফূর্ত বিভাজনের একটা সীমিত সম্ভাব্যতা থাকে। $\alpha$-বিঘটন তত্ত্বে আলোচিত সুড়ংগ-প্রক্রিয়া (Tunnel Effect) হচ্ছে এর জন্য দায়ী (12·15 অনুচ্ছেদ দ্রষ্টব্য)। এক্ষেত্রে স্বতঃস্ফূর্ত বিভাজনের অর্ধজীবনকাল খুব দীর্ঘ হয়। $U^{238}$ এর ক্ষেত্রে এই অর্ধজীবনকাল প্রায় $10^{16}$ বৎসর হয়।

নিউট্রন ছাড়া অন্যান্য কেন্দ্রকীয় কণিকার (যথা প্রোটন, $\alpha$-কণিকা) বা $\gamma$-রশ্মির দ্বারাও কেন্দ্রক বিভাজন অনুষ্ঠিত করা যায়। স্পষ্টতঃ আহিত কণিকার দ্বারা বিভাজন অনুষ্ঠিত করা বেশ কষ্টসাধ্য। কারণ এগুলি ভারী কেন্দ্রকের আধানের দ্বারা প্রবল ভাবে বিকৃষ্ট হয়। এদের দ্বারা বিভাজনের জন্য খুব উচ্চশক্তি প্রয়োজন হয়। অপরপক্ষে কয়েক মি-ই-ভো শক্তি সম্পন্ন $\gamma$-রশ্মির দ্বারা বিভাজন অনুষ্ঠিত করা সম্ভব। এই জাতীয় বিভাজনকে ফোটো-বিভাজন (Photo Fission) আখ্যা দেওয়া হয়।

## 19·8 : ব্যবহারিক প্রয়োজনে কেন্দ্রকীয় শক্তি উৎপাদন ; কেন্দ্রকীয় বিক্রিয়ক

পরমাণু কেন্দ্রকের মধ্যেকার বিপুল শক্তি ভাণ্ডারের কথা তেজস্ক্রিয়তা আবিষ্কারের পর থেকেই জানা যায়। কিন্তু এই শক্তিকে ব্যবহারিক প্রয়োজনে কাজে লাগান সম্ভব হয় কেন্দ্রক বিভাজন আবিষ্কারের পরে। তেজস্ক্রিয় পরমাণুর বিঘটনের সময়ে যে শক্তি নিঃসৃত হয় তার মোট পরিমাণ যথেষ্ট হয় না। তাছাড়া শক্তি নিঃসরণের হার খুবই মন্থর হয়। উদাহরণস্বরূপ এক গ্রাম রেডিয়াম থেকে প্রতি সেকেণ্ডে নিঃসৃত শক্তি নির্ণয় করা যেতে পারে। যেহেতু $Ra^{226}$ কেন্দ্রকের $\alpha$-বিঘটন শক্তি হচ্ছে 4·88 মি-ই-ভো, অতএব

$$E = \frac{3{\cdot}7\times10^{10}\times4{\cdot}88\times1{\cdot}6\times10^{-6}}{10^{7}\times10^{3}\times3600} = 8\times10^{-9}\ \text{kwh}$$

স্পষ্টতঃ ব্যবহারিক প্রয়োজনের পক্ষে এই শক্তি নিঃসরণ হার সম্পূর্ণ নগণ্য।

এছাড়া বিভিন্ন প্রকার শক্তি-দায়ী (Exoergic) কেন্দ্রক বিক্রিয়ার সময়েও শক্তি নিঃসৃত হয়। উদাহরণস্বরূপ $Li^{6}(d,\alpha)\ He^{4}$ বিক্রিয়ার $Q$-সংখ্যার মান হচ্ছে 22·4 মি-ই-ভো ; অর্থাৎ নিউক্লীয়ন প্রতি (22·4/8) বা প্রায় 2·8 মি-ই-ভো শক্তি নিঃসৃত হয়। কেন্দ্রক বিভাজনের সময় নিউক্লীয়ন প্রতি নিঃসৃত 0·85 মি-ই-ভো শক্তির তুলনায় উপরোক্ত শক্তি অনেক বেশী হয়। কিন্তু এই ধরনের বিক্রিয়ায় এক কালে নিঃসৃত মোট শক্তির পরিমাণ খুবই নগণ্য হয়। কারণ কণিকা ত্বরণযন্ত্র থেকে প্রাপ্ত ডয়টেরনগুচ্ছ যখন লিথিয়াম লক্ষ্যবস্তুর (Target) উপরে আপতিত হয়, তখন তাদের মধ্যে খুব অল্প সংখ্যক ডয়টেরনই বিক্রিয়া সংঘটিত করে। তাছাড়া ত্বরণযন্ত্র পরিচালনার জন্য যে শক্তির প্রয়োজন হয় মোট নিঃসৃত শক্তি তার তুলনায় খুব কম হয়। সুতরাং ব্যবহারিক প্রয়োজনে এই সব শক্তি-নিঃসারক বিক্রিয়া থেকে প্রাপ্ত শক্তিকে কাজে লাগান সম্ভব হয় না।*

কেন্দ্রক বিভাজনের সময়ে শুধু যে প্রচুর পরিমাণে শক্তি নিঃসৃত হয় তাই নয়, বিভাজন উৎপাদনের জন্য প্রয়োজনীয় নিউট্রনও একই সময়ে নিঃসৃত হয় (19·4 অনুচ্ছেদ দ্রষ্টব্য)। আমরা দেখেছি যে বিভাজন অনুষ্ঠিত করতে

---

* বিঃ দ্রঃ। বর্তমানে অবশ্য তাপীয় কেন্দ্রক বিক্রিয়ার (Thermo Nuclear Reaction) দ্বারা এই ধরনের শক্তি-দায়ী বিক্রিয়া থেকে প্রাপ্ত শক্তিকে ব্যবহারিক প্রয়োজনে কাজে লাগানোর প্রচেষ্টা হচ্ছে (19·13 অনুচ্ছেদ দ্রষ্টব্য)।

হলে একটি ভারী কেন্দ্রকের উপরে নিউট্রন বর্ষণ করতে হয়। বিভাজনের ফলে যে সব নিউট্রন নিঃসৃত হয় তাদের মধ্যে কতকগুলি আবার অন্যান্য বিভাজনীয় (Fissionable) কেন্দ্রকের মধ্যে প্রবেশ করে এদের বিভাজিত করতে পারে। এই সব বিভাজন অনুষ্ঠিত হবার সময়ে আবার প্রত্যেকটি বিভাজনে কতকগুলি করে নূতন নিউট্রন নিঃসৃত হবে। এদের মধ্যে কতকগুলি আবার অন্যান্য বিভাজনীয় কেন্দ্রককে বিভাজিত করতে পারে। এই ভাবে বিভাজন প্রক্রিয়া যেন নিরবচ্ছিন্ন শৃংখলবদ্ধ ভাবে চলতে থাকবে। প্রত্যেক বিভাজনে কিছু পরিমাণ শক্তি নিঃসৃত হয়। যখন বহু সংখ্যক কেন্দ্রক এইরূপ স্বতশ্চালিত (Self-Sustained) ভাবে বিভাজিত হতে থাকবে, তখন বিপুল পরিমাণ শক্তি উদ্ভূত হবে। এইরূপ স্বতশ্চালিত বিভাজনকে 'শৃংখল-বিক্রিয়া' (Chain Reaction) আখ্যা দেওয়া হয়।

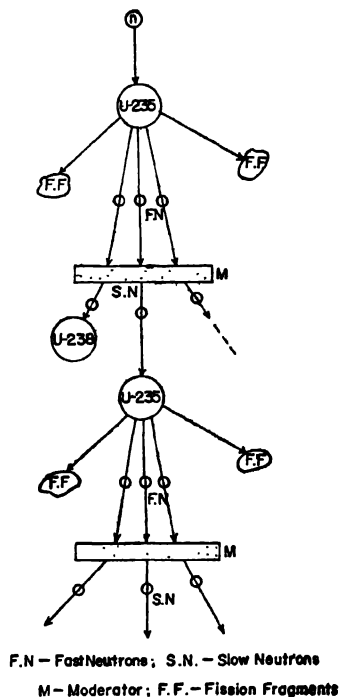
স্পষ্টতঃ উপরে আলোচিত শৃংখল-বিক্রিয়া স্বতশ্চালিত ভাবে অনুষ্ঠিত হবার শর্ত হচ্ছে যে প্রত্যেকটি নিউট্রন কর্তৃক বিভাজন উৎপাদনের ফলে নবসৃষ্ট নিউট্রনগুলির মধ্যে গড়ে অন্ততঃ একটি করে নিউট্রন যেন পরবর্তী পর্যায়ে আর একটি বিভাজন উৎপন্ন করতে পারে। বিভাজনীয় পদার্থ বা কেন্দ্রকীয় জ্বালানী (Nuclear Fuel) এবং অন্যান্য পদার্থ দ্বারা নির্মিত কেন্দ্রকীয় বিক্রিয়কের (Nuclear Reactor) মধ্যে এইরূপ স্বতশ্চালিত শৃংখল-বিক্রিয়া অনুষ্ঠিত করা হয়। প্রখ্যাত ইতালীয়ান বিজ্ঞানী এন্‌রিকো ফের্মি (যিনি পরবর্তী যুগে আমেরিকায় স্থায়ীভাবে বসবাস করেন) সর্বপ্রথম ১৯৪২ সালে আমেরিকার শিকাগো বিশ্ববিদ্যালয়ে এইরূপ একটি বিক্রিয়ক নির্মাণ করে স্বতশ্চালিত শৃংখল-বিক্রিয়া অনুষ্ঠানের পথ প্রদর্শন করেন। তাঁর এই যুগান্তরকারী অবদান ব্যবহারিক প্রয়োজনে কেন্দ্রকীয় শক্তি উৎপাদনের পথে প্রথম সোপান।

কেন্দ্রকীয় বিক্রিয়কের মধ্যে শুধু যে কেন্দ্রকীয় শক্তি উৎপাদন করা হয় তাই নয়, শক্তি উৎপাদনের হারও প্রয়োজন মত নিয়ন্ত্রিত করা যায়। মোট উৎপন্ন শক্তি যদি খুব অল্প সময়ের মধ্যে উদ্ভূত হয়, তাহলে বিস্ফোরণ ঘটতে পারে। বস্তুতঃ কেন্দ্রকীয় বা পরমাণবিক বোমার (Atomic Bomb) মধ্যে এইরূপ অনিয়ন্ত্রিত ভাবে বিপুল পরিমাণ শক্তি নিঃসৃত হয় বলেই বিস্ফোরণ ঘটে। উদাহরণস্বরূপ প্রত্যেকটি $U^{235}$ কেন্দ্রক বিভাজনের ফলে নিঃসৃত নিউট্রনগুলির মধ্যে যদি গড়ে দুটি নিউট্রন পরবর্তী পর্যায়ে দুটি করে নূতন কেন্দ্রক বিভাজিত করে, তাহলে এই বিভাজনের ফলে উৎপন্ন নিউট্রনগুলি

আবার তৃতীয় পর্যায়ে $2^2$ বা চারটি নূতন কেন্দ্রক বিভাজিত করবে। এইসব বিভাজনের ফলে উৎপন্ন নিউট্রনগুলি আবার চতুর্থ পর্যায়ে $2^3$ বা আটটি কেন্দ্রক বিভাজিত করবে। এইভাবে চলতে থাকলে 73 ক্রমের পর্যায়ে মোট বিভাজিত কেন্দ্রকের সংখ্যা $2^{72}$ বা প্রায় $4 \times 10^{21}$ হবে। যেহেতু এক গ্রাম $U^{235}$ আইসোটোপের মধ্যে প্রায় $2{\cdot}56 \times 10^{21}$ কেন্দ্রক থাকে, অতএব উপরোক্ত প্রক্রিয়ার ফলে 73 পর্যায়ের মধ্যে সব কেন্দ্রকগুলি বিভাজিত হবে এবং মোট $2{\cdot}28 \times 10^4$ kwh শক্তি উৎপন্ন হবে (19·2 অনুচ্ছেদ দ্রষ্টব্য)। যদি ধরা যায় যে এক্ষেত্রে বিভাজন অনুষ্ঠিত হয় উচ্চশক্তি নিউট্রন দ্বারা, যাদের বেগ হয় প্রায় $10^9$ সেমি/সেকেণ্ডে, এবং উৎপাদনের পর থেকে পরবর্তী পর্যায়ে শোষিত হওয়া পর্যন্ত প্রতিটি নিউট্রন গড়ে প্রায় 10 সেমি পথ পরিভ্রমণ করে, তাহলে পরপর দুটি পর্যায়ের মধ্যে নিউট্রন শোষণের জন্য প্রয়োজনীয় গড় সময় প্রায় $10^{-8}$ সেকেণ্ড হয়। সুতরাং মোট 73 সংখ্যক পর্যায়ে সব কেন্দ্রকগুলি বিভাজিত হবার জন্য সময় লাগবে প্রায় $10^{-6}$ সেকেণ্ড। অর্থাৎ উপরোক্ত বিপুল পরিমাণ শক্তি মাত্র $10^{-6}$ সেকেণ্ডের মধ্যে উদ্ভূত হবে। স্পষ্টতঃ এক্ষেত্রে প্রচণ্ড বিস্ফোরণ ঘটবে।

ফের্মি যে কেন্দ্রকীয় বিক্রিয়ক উদ্ভাবিত করেন তার মধ্যে প্রাকৃতিক ইউরেনিয়াম এবং গ্র্যাফাইট ব্যবহার করা হয়। এখানে গ্র্যাফাইট নিউট্রনের বেগ-নিয়ন্ত্রক (Moderator) হিসাবে কাজ করে। গ্র্যাফাইটের মধ্যেকার কার্বন পরমাণুর কেন্দ্রকের সংগে বারবার সংঘাতের ফলে উচ্চশক্তি বিভাজন নিউট্রনগুলি শক্তিক্ষয় করে তাপীয় নিউট্রনে (Thermal Neutrons) পর্যবসিত হয়। এই অবস্থায় সেগুলি কর্তৃক প্রাকৃতিক ইউরেনিয়ামের মধ্যে বর্তমান বিরল আইসোটোপ $U^{235}$ (যার প্রাচুর্য মাত্র 0·7%) দ্বারা শোষিত হয়ে বিভাজন উৎপন্ন করার সম্ভাব্যতা বেশ উচ্চ হয় (19·5 অনুচ্ছেদ দ্রষ্টব্য)। বিক্রিয়কের মধ্যে ইউরেনিয়াম দণ্ডগুলি এবং গ্র্যাফাইটের পিণ্ডগুলি এমনভাবে বিন্যস্ত করা হয় যে স্বতশ্চালিত শৃংখল-বিক্রিয়া অনুষ্ঠিত হতে পারে।

স্বতশ্চালিত শৃংখল-বিক্রিয়া অনুষ্ঠিত হবে কী না তা নির্ভর করে বিক্রিয়কের 'পরিবর্ধন-ধ্রুবকের' (Multiplication Constant) উপরে। যদি একটি বিক্রিয়কের মধ্যে কোন পর্যায়ে $n$ সংখ্যক নিউট্রন শোষিত হয়ে বিভাজন উৎপন্ন করে এবং তার ফলে নবসৃষ্ট নিউট্রনগুলির মধ্যে মোট $N$ সংখ্যক নিউট্রন পরবর্তী পর্যায়ে বিভাজন উৎপাদনের জন্য পাওয়া যায়, তাহলে $N$ এবং $n$ সংখ্যা দুটির অনুপাতকে বলা হয় বিক্রিয়কের পরিবর্ধন-ধ্রুবক ($k$)।

স্পষ্টতঃ $k=N/n > 1$ হলে তবেই স্বতশ্চালিত শৃংখল-বিক্রিয়া অনুষ্ঠিত হতে পারে। $k=1$ হলে বিক্রিয়কের মধ্যে একটা নির্দিষ্ট হারে কেন্দ্রক বিভাজন চলতে থাকে, যার ফলে নির্দিষ্ট হারে শক্তি উৎপন্ন হতে থাকে। যদি $k > 1$ হয়, তাহলে এক পর্যায় থেকে পরবর্তী পর্যায়ে বিভাজন হার বৃদ্ধি পায়, যার ফলে শক্তি উৎপাদনের হার ক্রমশঃ বৃদ্ধি পেতে থাকে। অপরপক্ষে যদি $k < 1$ হয়, তাহলে বিভাজনের হার ক্রমশঃ হ্রাস পায় এবং শৃংখল-বিক্রিয়া কিছুক্ষণ পরে থেমে যায়। এক্ষেত্রে শক্তি উৎপাদনের হার ক্রমশঃ কমতে থাকে।

চিত্র 19·4

কেন্দ্রকীয় শৃংখল-বিক্রিয়া প্রণালীর চিত্ররূপ।

পরিবর্ধন ধ্রুবকের মান নির্ভর করে বিক্রিয়কের মধ্যে ব্যবহৃত কেন্দ্রকীয় জ্বালানী এবং নিয়ন্ত্রকের (Moderator) প্রকৃতি ও বিন্যাসের উপরে। তাছাড়া বিক্রিয়কের মধ্যে উপস্থিত অন্যান্য পদার্থের নিউট্রন শোষণ ক্ষমতার উপরেও এই ধ্রুবকের মান নির্ভর করে।

তাপীয় নিউট্রন দ্বারা বিক্রিয়কের মধ্যে কী ভাবে স্বতশ্চালিত শৃংখল-বিক্রিয়া অনুষ্ঠিত হতে পারে তা (19·4) চিত্রের সাহায্যে ব্যাখ্যা করা যায়। এই চিত্র থেকে দেখা যায় যে একটি তাপীয় নিউট্রন প্রথমে একটি $U^{235}$ কেন্দ্রক বিভাজিত করে দুটি বিভাজন-খণ্ড (F.F.) এবং কয়েকটি উচ্চশক্তি নিউট্রন (F.N.) উৎপন্ন করে। এই নিউট্রনগুলি একটি নিয়ন্ত্রকের মধ্যে পরিভ্রমণ করে শক্তিক্ষয় করে এবং তাপীয় নিউট্রনে (S.N.) পর্যবসিত হয়। এদের মধ্যে একটি তাপীয় নিউট্রন আবার দ্বিতীয় আর একটি $U^{235}$ কেন্দ্রক বিভাজিত করে। অন্য নিউট্রনগুলি বিক্রিয়কের মধ্যে উপস্থিত অন্যান্য পদার্থের মধ্যে ( প্রধানতঃ $U^{238}$ আইসোটোপের মধ্যে ) শোষিত হয়ে যায়। দ্বিতীয় পর্যায়ের বিভাজনের ফলে আবার দুটি বিভাজন-খণ্ড এবং কয়েকটি উচ্চশক্তি নিউট্রন নিঃসৃত হয়। এই নিউট্রনগুলি আবার নিয়ন্ত্রকের মধ্যে শক্তিক্ষয় করে তাপীয় নিউট্রনে পর্যবসিত হয়। পূর্বের মত এদের মধ্যে একটি আবার তৃতীয় আর একটি $U^{235}$ কেন্দ্রক বিভাজিত করে। এইভাবে পর্যায়ের পর পর্যায়ে বিভাজন প্রক্রিয়া চলতে থাকে।

মনে করা যাক যে কোন বিশেষ পর্যায়ে $n$ তাপীয় নিউট্রন $U^{235}$ কেন্দ্রক বিভাজিত করে এবং প্রত্যেক বিভাজনে $\nu$ উচ্চশক্তি নিউট্রন সৃষ্ট হয়। অর্থাৎ প্রথম পর্যায়ে বিভাজনের ফলে মোট $n\nu$ উচ্চশক্তি নিউট্রন সৃষ্ট হয়। বস্তুতঃ নবসৃষ্ট উচ্চশক্তি বিভাজন-নিউট্রনের সংখ্যা $n\nu$ অপেক্ষা অল্প বেশী হয়। কারণ কিছু উচ্চশক্তি নিউট্রন $U^{238}$ কর্তৃক শোষিত হয়ে এই আইসোটোপের কেন্দ্রক বিভাজিত করে। এইরূপ প্রত্যেক বিভাজনে একাধিক উচ্চশক্তি নিউট্রন উৎপন্ন হয়। ফলে যতগুলি উচ্চশক্তি নিউট্রন এইভাবে শোষিত হয় তার চেয়ে বেশী সংখ্যক অনুরূপ নিউট্রন সৃষ্ট হয়। সুতরাং মোট উচ্চশক্তি বিভাজন-নিউট্রনের সংখ্যা পেতে হলে $n\nu$ সংখ্যাটিকে এক অপেক্ষা বৃহত্তর একটি সংখ্যা $\varepsilon$ দ্বারা গুণ করতে হবে। $\varepsilon$ সংখ্যাটিকে বলা হয় 'দ্রুত-বিভাজন সংখ্যা' (Fast Fission Factor) ; স্পষ্টতঃ $\varepsilon > 1$ হয়, এবং মোট উৎপন্ন উচ্চশক্তি নিউট্রনের সংখ্যা $n\nu\varepsilon$ হয়।

এই নিউট্রনগুলি গ্র্যাফাইট নিয়ন্ত্রকের মধ্য দিয়ে পরিভ্রমণ কালে শক্তিক্ষয় করতে থাকে। এই শক্তিক্ষয়ের সময়ে কিছু নিউট্রন বিক্রিয়কের অভ্যন্তরে বর্তমান নানাবিধ পদার্থের দ্বারা শোষিত হয়। এদের মধ্যে বেশীর ভাগই ইউরেনিয়ামের পর্যাপ্ত আইসোটোপ $U^{238}$ কর্তৃক শোষিত হয়। নিউট্রনগুলি শক্তিক্ষয় করতে করতে যখন কতকগুলি বিশেষ শক্তি প্রাপ্ত হয় প্রধানতঃ

তখনই এইরূপ শোষণ ঘটে। এইরূপ শোষণকে অনুনাদী আহরণ (Resonance Capture) বলা হয় (17·14 অনুচ্ছেদ দ্রষ্টব্য)। শক্তিক্ষয় কালে যে সব নিউট্রন এইরূপ শোষণের হাত থেকে রক্ষা পায় সেইগুলিই অবশেষে তাপীয় নিউট্রনে পর্যবসিত হয়। যদি সৃষ্ট বিভাজন-নিউট্রনের $p$-অংশ শোষণের হাত থেকে রক্ষা পায়, তাহলে মোট উৎপন্ন তাপীয় নিউট্রনের সংখ্যা $n\nu\varepsilon p$ হয়। $p$ সংখ্যাটিকে বলা হয় 'অনুনাদ-উপেক্ষণ সম্ভাব্যতা' (Resonance Escape Probablity)।

এইসব তাপীয় নিউট্রনের একটা অংশ $f$ শোষিত হয় কেন্দ্রকীয় জ্বালানীর (এক্ষেত্রে ইউরেনিয়ামের) দ্বারা, বাকী অংশ $(1-f)$ শোষিত হয় বিক্রিয়কের ভিতরে বর্তমান অন্যান্য পদার্থের দ্বারা। স্পষ্টতঃ জ্বালানীর দ্বারা শোষিত তাপীয় নিউট্রনের মোট সংখ্যা $n\nu\varepsilon pf$ হয়। $f$ সংখ্যাটিকে বলা হয় 'তাপীয়-ব্যবহার সংখ্যা' (Thermal Utilization Factor)।

জ্বালানীর মধ্যে যে সব তাপীয় নিউট্রন শোষিত হয় তার কিছু অংশ বিভাজনীয় কেন্দ্রক সমূহের ($U^{235}$) মধ্যে শোষিত হয়ে পরবর্তী পর্যায়ে বিভাজন উৎপন্ন করে। বাকী নিউট্রনগুলি $U^{235}$ বা $U^{238}$ কেন্দ্রক সমূহের মধ্যে শোষিত হয়ে অন্যান্য ধরনের কেন্দ্রক বিক্রিয়া অনুষ্ঠিত করে। মনে করা যাক যে জ্বালানীর মধ্যে শোষিত নিউট্রনের $g$ অংশ দ্বিতীয় পর্যায়ে কেন্দ্রক বিভাজন উৎপন্ন করে। সুতরাং প্রথম পর্যায়ে $n$ তাপীয় নিউট্রন শোষিত হয়ে কেন্দ্রক বিভাজন অনুষ্ঠিত করার ফলে উৎপন্ন নিউট্রনগুলির মধ্যে দ্বিতীয় পর্যায়ে মোট $N=n\nu\varepsilon pfg$ তাপীয় নিউট্রন পাওয়া যায়, নূতন করে কেন্দ্রক বিভাজন অনুষ্ঠিত করার জন্য। সুতরাং পরিবর্ধন-ধ্রুবকের মান হবে

$$k=\frac{N}{n}=\frac{n\nu\varepsilon pfg}{n}=(\nu g)\varepsilon pf$$

যেহেতু প্রত্যেকটি $U^{235}$ কেন্দ্রক বিভাজনের ফলে $\nu$ সংখ্যক দ্রুতগতি নিউট্রন উৎপন্ন হয়, অতএব জ্বালানীর মধ্যে একটি তাপীয় নিউট্রন শোষণের ফলে উৎপন্ন মোট দ্রুতগতি নিউট্রনের সংখ্যা $\eta=\nu g$ হয়। সুতরাং আমরা পাই

$$k=\eta\varepsilon pf \tag{19·3}$$

উপরের আলোচনায় অনুমান করা হয়েছে যে বিক্রিয়ক থেকে কোন নিউট্রন বাইরে নির্গত হতে পারে না। বিক্রিয়কটি আয়তনে অসীম হলেই তবে

এইরূপ হওয়া সম্ভব। বাস্তব ক্ষেত্রে বিক্রিয়কের বিভিন্ন পৃষ্ঠতলের মধ্য দিয়ে কিছু নিউট্রন নির্গত হয়ে যায়। এই নিউট্রনগুলি বিভাজনের কাজে লাগে না। ফলে পরিবর্ধন-ধ্রুবকের প্রকৃত মান (19·3) সমীকরণ থেকে প্রাপ্ত মান অপেক্ষা কম হয়। বিক্রিয়কের আয়তন যত ছোট হয়, উপরোক্ত পদ্ধতিতে নিউট্রন ক্ষয়ের পরিমাণ তত বৃদ্ধি পায়। বস্তুতঃ বিক্রিয়কটি একটা ন্যূনতম আয়তন অপেক্ষা বৃহত্তর না হলে পরিবর্ধন-ধ্রুবকের মান এক বা ততোধিক করা সম্ভব হয় না; অর্থাৎ বিক্রিয়কের মধ্যে স্বতশ্চালিত শৃংখল-বিক্রিয়া অনুষ্ঠিত করা সম্ভব হয় না।

$\eta$ সংখ্যাটির মান সহজেই নির্ণয় করা যায়। যদি $\sigma_f$ এবং $\sigma_a$ হয় যথাক্রমে বিভাজন প্রস্থচ্ছেদ ও মোট শোষণ প্রস্থচ্ছেদ এবং $U^{235}$ ও $U^{238}$ আইসোটোপ দুটিকে যথাক্রমে 1 এবং 2 পাদচিহ্ন দ্বারা নির্দেশ করা যায়, তাহলে আমরা লিখতে পারি

$$\eta = \nu g = \nu \cdot \frac{\sigma_{1f} n_1 + \sigma_{2f} n_2}{\sigma_{1a} n_1 + \sigma_{2a} n_2} = \nu \cdot \frac{\sigma_{1f} + \sigma_{2f} \dfrac{n_2}{n_1}}{\sigma_{1a} + \sigma_{2a} \dfrac{n_2}{n_1}}$$

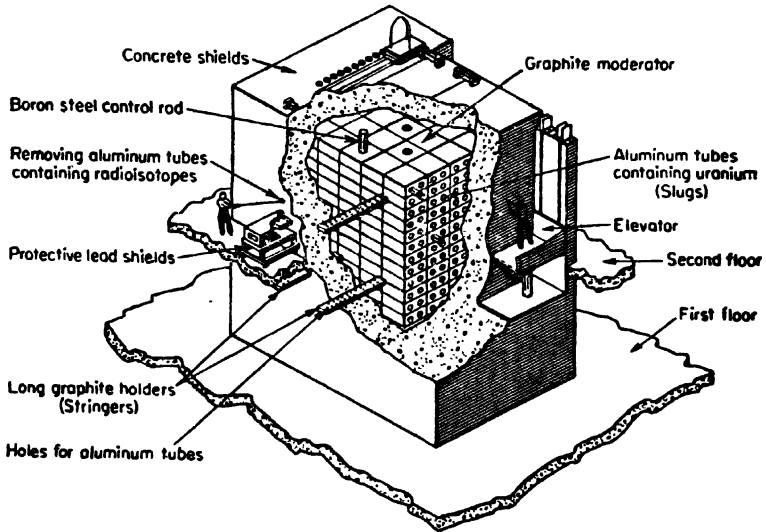
এখানে $n_1$ এবং $n_2$ হচ্ছে ব্যবহৃত জ্বালানীর মধ্যে যথাক্রমে $U^{235}$ ও $U^{238}$ পরমাণুর সংখ্যা-ঘনত্ব।

প্রাকৃতিক ইউরেনিয়ামে $n_2/n_1 = 139$ হয়। তাপীয় নিউট্রনের ক্ষেত্রে $\sigma_{1f} = 580$ বার্ন, $\sigma_{2f} = 0$, $\sigma_{1a} = 690$ বার্ন এবং $\sigma_{2a} = 2{\cdot}8$ বার্ন হয়।

যেহেতু $U^{235}$ এর ক্ষেত্রে $\nu = 2{\cdot}5$ হয়, অতএব আমরা তাপীয় নিউট্রনের জন্য পাই

$$\eta = \frac{\sigma_{1f}\nu}{\sigma_{1a} + \sigma_{2a} \dfrac{n_2}{n_1}} = \frac{580 \times 2{\cdot}5}{690 + 2{\cdot}8 \times 139} = 1{\cdot}34$$

অর্থাৎ প্রাকৃতিক ইউরেনিয়াম জ্বালানীর মধ্যে প্রতিটি তাপীয় নিউট্রন শোষণের জন্য গড়ে 1·34 সংখ্যক দ্রুতগতি নিউট্রন উৎপন্ন হয়। যেহেতু $\varepsilon$ সংখ্যাটি এক অপেক্ষা সামান্য বড় হয় ($\varepsilon \approx 1{\cdot}03$), অতএব (19·3) সমীকরণ থেকে $k = 1{\cdot}38pf$ পাওয়া যায়। সুতরাং $pf = 0{\cdot}724$ বা বেশী হলে তবেই শৃংখল-বিক্রিয়া স্বতশ্চালিত ভাবে অনুষ্ঠিত হতে পারে।

$p$ এবং $f$ দুটি সংখ্যাই কেন্দ্রকীয় জ্বালানী এবং নিয়ন্ত্রকের প্রকৃতির উপরে নির্ভর করে। বাস্তব ক্ষেত্রে দেখা যায় যে $p$ এর মান বৃদ্ধি করার চেষ্টা করলে $f$ হ্রাস পায়; অপরপক্ষে $f$ বৃদ্ধি পেলে $p$ হ্রাস পায়। ইউরেনিয়াম এবং গ্র্যাফাইটের সমতত্ত্ব (Homogeneous) মিশ্রণ ব্যবহার না করে এদের অসমতত্ত্ব (Heterogeneous) ভাবে বিন্যস্ত রাখলে ($pf$) সংখ্যাটির মান উচ্চতর হয়। সেজন্য বহু সংখ্যক গ্র্যাফাইট পিণ্ড (Blocks) দ্বারা নির্মিত একটি বৃহদায়তন ঘনকের মধ্যে কিছু দূর পর পর অবস্থিত কতকগুলি নির্ধারিত স্থানে লম্বা এবং সরু ইউরেনিয়াম দণ্ডগুলিকে একটা নির্দিষ্ট জ্যামিতিক বিন্যাসে ( জাফরির আকারে ) সন্নিবিষ্ট করা হয় (19·5 চিত্র

চিত্র 19·5

গ্র্যাফাইট নিয়ন্ত্রিত এবং প্রাকৃতিক ইউরেনিয়াম দ্বারা নির্মিত তাপীয় নিউট্রন বিক্রিয়কের চিত্ররূপ।

দ্রষ্টব্য)। গ্র্যাফাইট ঘনকটির বাহুগুলির দৈর্ঘ্য প্রায় 25 ফুট হয় এবং মোট ব্যবহৃত গ্র্যাফাইটের ওজন কয়েকশত টন হয়। ইউরেনিয়ামের পরিমাণ সাধারণতঃ কুড়ি-পঁচিশ টন হয়। ফের্মি প্রথম যে বিক্রিয়ক নির্মাণ

করেন তার অনুভূমিক প্রস্থচ্ছেদের বাহুগুলির দৈর্ঘ্য ছিল প্রায় 22 ফুট এবং উচ্চতা ছিল 19 ফুট। ইউরেনিয়াম ব্যবহার করা হয় প্রায় 6·2 টন।

পরিবর্ধন-ধ্রুবক $k=1$ হলে বলা হয় যে বিক্রিয়কটি 'সংকট-অবস্থা' (Critical Condition) প্রাপ্ত হয়েছে।

$k > 1$ হলে বিক্রিয়কটি সংকটোত্তর (Super Critical) অবস্থা প্রাপ্ত হয়। এই অবস্থায় বিভাজন বিক্রিয়া ক্রমবর্ধমান হারে অনুষ্ঠিত হতে থাকে, ফলে বিক্রিয়কের মধ্যে খুব দ্রুত ক্রমবর্ধমান হারে শক্তি উৎপন্ন হতে থাকে। শক্তি উৎপাদন হারের বৃদ্ধি নিয়ন্ত্রিত করার জন্য বিক্রিয়কের মধ্যে কয়েকটি তাপীয় নিউট্রন শোষক পদার্থ (যথা ক্যাড্‌মিয়াম) দ্বারা নির্মিত দণ্ড ইচ্ছামত অনুপ্রবেশ করানর ব্যবস্থা থাকে। এই দণ্ডগুলি প্রথমে বিক্রিয়কের বাইরে রাখা থাকে। এর ফলে বিক্রিয়কটি সংকটোত্তর অবস্থা প্রাপ্ত হয় এবং এর মধ্যে বিভাজন এবং শক্তি উৎপাদন হার বৃদ্ধি পায়। যখন শক্তি উৎপাদন হার পূর্ব নির্ধারিত নির্দিষ্ট মান প্রাপ্ত হয়, তখন শোষক দণ্ডগুলিকে বিক্রিয়কের মধ্যে প্রয়োজন মত অনুপ্রবেশ করান হয়, যাতে শক্তি উৎপাদনের হার আর বৃদ্ধি না পায় এবং উপরোক্ত নির্দিষ্ট হারে শক্তি উৎপন্ন হতে থাকে; অর্থাৎ বিক্রিয়ক সংকট অবস্থায় কাজ করতে থাকে। সাধারণতঃ বিক্রিয়কের মধ্যে বিভিন্ন স্থানে নিউট্রন নির্দেশক যন্ত্র, যথা বোরন-ট্রাইফ্লোরাইড সংখ্যায়ক স্থাপিত থাকে। নিউট্রন উৎপাদনের হার নিরীক্ষণ করে বিক্রিয়কটি কী অবস্থায় কাজ করে তা বোঝা যায়।

যেহেতু ইউরেনিয়াম দণ্ডগুলির মধ্যে বিভাজন বিক্রিয়া অনুষ্ঠিত হয়, বিভাজনের ফলে উৎপন্ন শক্তি প্রধানতঃ এই দণ্ডগুলিকে উত্তপ্ত করে তোলে। সেজন্য এগুলিকে শীতল করা প্রয়োজন হয়। দণ্ডগুলিকে বেষ্টন করে জল অথবা কোন গ্যাস প্রবাহিত করা হয় যার সাহায্যে সেগুলি শীতলীকৃত হয়। এই তাপ-আহরক জল উত্তপ্ত হয়ে বাষ্পে পরিণত হলে একে বৈদ্যুতিক শক্তি উৎপাদনের কাজে প্রয়োগ করা যায়। এইভাবে বিক্রিয়কে উৎপন্ন শক্তিকে ব্যবহারিক প্রয়োজনে কাজে লাগান সম্ভব।

## 19·9 : বিভিন্ন প্রকার কেন্দ্রকীয় বিক্রিয়ক এবং তাদের ব্যবহার

১৯৪২ সালে ফের্মি কর্তৃক প্রথম কেন্দ্রকীয় বিক্রিয়ক উদ্ভাবনের পরে পরবর্তী যুগে বিক্রিয়ক শিল্প-বিজ্ঞানের ক্ষেত্রে প্রভূত উন্নতি সাধন হয়েছে।

ফলে বর্তমানে পৃথিবীর বিভিন্ন দেশে বহু সংখ্যক বিক্রিয়ক নির্মাণ করে সেগুলিকে নানারূপ কাজে ব্যবহার করা হয়।

নিয়ন্ত্রক হিসাবে অনেক বিক্রিয়কে গ্র্যাফাইটের পরিবর্তে ভারী জল (Heavy Water) অর্থাৎ $D_2O$ ব্যবহার করা হয়। এইরূপ বিক্রিয়ক পূর্বোক্ত ধরনের বিক্রিয়কের তুলনায় আয়তনে অনেক ছোট হয়। সাধারণতঃ প্রাকৃতিক ইউরেনিয়াম ব্যবহার করে এইরূপ বিক্রিয়ক নির্মাণ করা হয়। তাছাড়া সাধারণ জল ($H_2O$) নিয়ন্ত্রক হিসাবে ব্যবহার করেও বিক্রিয়ক নির্মাণ করা হয়। এই জাতীয় বিক্রিয়কে অবশ্য প্রাকৃতিক ইউরেনিাম ব্যবহার করা সম্ভব নয়। এক্ষেত্রে জলের মধ্যে বর্তমান হাইড্রোজেন কেন্দ্রক, অর্থাৎ প্রোটনের দ্বারা এত অধিক নিউট্রন শোষিত হয় যে বিক্রিয়কের সংকট-অবস্থা উৎপন্ন করা সম্ভব হয় না। সেজন্য বিশেষ প্রক্রিয়ার সাহায্যে, যথা তাপীয় ব্যাপন (Thermal Diffusion) পদ্ধতিতে, প্রাকৃতিক ইউরেনিয়াম থেকে বিরল আইসোটোপ $U^{235}$ পৃথকীকৃত করা হয়। পৃথকীকরণের সময় অবশ্য এর সংগে কিছু $U^{238}$ আইসোটোপও মিশ্রিত থেকে যায়। এইভাবে $U^{235}$ আইসোটোপে সমৃদ্ধ (Enriched) যে ইউরেনিয়াম উৎপন্ন হয়, তার মধ্যে উক্ত আইসোটোপের প্রাচুর্য প্রাকৃতিক ইউরেনিয়ামের তুলনায় অনেক বেশী হয়। এইরূপ সমৃদ্ধ $U^{235}$ এবং সাধারণ জল দ্বারা নির্মিত বিক্রিয়কের মধ্যে সংকট-অবস্থা উৎপন্ন করা সম্ভব হয়। সাধারণ জলপূর্ণ একটি বিশাল জলাধারের মধ্যে অসমসত্ত্ব (Heterogeneous) ভাবে বিন্যস্ত সমৃদ্ধ $U^{235}$ দ্বারা নির্মিত একটি জাফরি (Lattice) স্থাপিত করা হয়। এই ধরনের বিক্রিয়ককে সন্তরণ-জলাশয় (Swimming Pool) বিক্রিয়ক বলা হয়।

আর এক ধরনের বিক্রিয়কের মধ্যে $U^{235}$ সমৃদ্ধ ইউরেনিয়ামের কোন লবণকে ( যথা ইউরেনাইল সালফেট ) ভারী জলের মধ্যে দ্রবীভূত করে বিক্রিয়ক নির্মাণ করা হয়। এইরূপ বিক্রিয়ককে 'জল-স্ফুটক' (Water Boiler) বিক্রিয়ক বলা হয়। এইরূপ বিক্রিয়কের প্রধান সুবিধা হচ্ছে যে এক্ষেত্রে উচ্চ মূল্যের বিশুদ্ধ ধাতব ইউরেনিয়াম ব্যবহার করার প্রয়োজন হয় না।

বর্তমানে 'প্রজনক বিক্রিয়ক' (Breeder Reactor) নামক আর এক জাতীয় বিক্রিয়ক উদ্ভাবিত হয়েছে। এইরূপ বিক্রিয়কের মধ্যে যে বিভাজনীয় পদার্থ ব্যবহার করা হয় তার পুনরুৎপাদনের ব্যবস্থা থাকে। (19·12)

অনুচ্ছেদে দেখা যাবে যে প্রাকৃতিক ইউরেনিয়ামের পর্যাপ্ত আইসোটোপ $U^{238}$ নিউট্রন শোষণ করে অনুনাদী আহরণ বিক্রিয়া দ্বারা $U^{239}$ তেজস্ক্রিয় আইসোটোপে রূপান্তরিত হয়। পরপর দুবার $\beta^-$ বিঘটনের ফলে $U^{239}$ আইসোটোপ জোড়-বিজোড় জাতীয় $Pu^{239}$ $(Z=94)$ ইউরেনিয়ামোত্তর আইসোটোপে রূপান্তরিত হয়। $Pu^{239}$ তেজস্ক্রিয় হলেও এর অর্ধ-জীবনকাল খুব দীর্ঘ ( 24,400 বৎসর ) হয়। তাপীয় নিউট্রনের দ্বারা এই আইসোটোপটি সহজেই বিভাজিত হয়। অনুরূপে প্রাকৃতিক থোরিয়ামের $Th^{232}$ আইসোটোপটি নিউট্রন শোষণ দ্বারা $Th^{233}$ আইসোটোপে রূপান্তরিত হয়। $Th^{233}$ $(Z=90)$ পরপর দুবার $\beta^-$ বিঘটনের ফলে $U^{233}$ আইসোটোপে রূপান্তরিত হয়। জোড়-বিজোড় জাতীয় $U^{233}$ আইসোটোপটির অর্ধজীবনকাল হচ্ছে 163,000 বৎসর। $Pu^{239}$ আইসোটোপের মত এটিও তাপীয় নিউট্রন দ্বারা সহজেই বিভাজিত হয়। এদের অর্ধজীবনকাল খুব দীর্ঘ হওয়ার জন্য $Pu^{239}$ বা $U^{233}$ আইসোটোপ দুটিকে প্রভূত পরিমাণে উৎপন্ন করা সম্ভব ( 17·18 অনুচ্ছেদ দ্রষ্টব্য )।

$U^{238}$ এবং $Th^{232}$ আইসোটোপগুলিকে বলা হয় 'উর্বর পদার্থ' (Fertile Materials)। কারণ এগুলিকে বিভাজনীয় পদার্থে রূপান্তরিত করা যায়। প্রাকৃতিক ইউরেনিয়াম দ্বারা নির্মিত বিক্রিয়কের মধ্যে উৎপন্ন নিউট্রন সমূহের একটা বৃহদংশ $U^{238}$ আইসোটোপের মধ্যে শোষিত হয়ে নূতন করে বিভাজনীয় পদার্থ $Pu^{239}$ উৎপন্ন করে। যেহেতু প্লুটোনিয়াম হচ্ছে ইউরেনিয়াম থেকে স্বতন্ত্র একটি রাসায়নিক মৌল, এটিকে সহজেই রাসায়নিক প্রক্রিয়ায় ইউরেনিয়াম থেকে পৃথকীকৃত করা যায় এবং বিক্রিয়কের মধ্যে বিভাজনীয় পদার্থ হিসাবে ব্যবহার করা যায়। অনুরূপে কোন বিক্রিয়কের মধ্যে যদি পর্যাপ্ত পরিমাণে থোরিয়াম রাখা থাকে, তাহলে এই থোরিয়াম থেকেও নূতন করে বিভাজনীয় পদার্থ $U^{233}$ পাওয়া যায়।

প্রজনক বিক্রিয়কের মধ্যে এমন ব্যবস্থা করা হয় যে প্রত্যেকটি বিভাজনের জন্য অন্ততঃ একটি করে উদ্বৃত্ত বিভাজনীয় কেন্দ্রক উৎপন্ন হয়। অর্থাৎ বিক্রিয়ক চালাবার জন্য যতটা বিভাজনীয় পদার্থের প্রয়োজন অন্ততঃ সমপরিমাণ উদ্বৃত্ত বিভাজনীয় পদার্থ এইরূপ বিক্রিয়কের মধ্যে উৎপন্ন হয়। সাধারণতঃ বিক্রিয়ককে আবেষ্টন করে উর্বর পদার্থের একটা আচ্ছাদন রাখা হয়, যার মধ্যে নূতন বিভাজনীয় কেন্দ্রকগুলি উৎপন্ন হয়। তাপীয় নিউট্রনের পরিবর্তে দ্রুতগতি (Fast) নিউট্রন দ্বারা বিভাজন উৎপন্ন

করে 'দ্রুত-প্রজনক বিক্রিয়ক' (Fast Breeder Reactor) নির্মাণ করা অধিকতর সুবিধাজনক।

এর কারণ সহজেই বোঝা যায়। প্রজননের (Breeding) জন্য $\eta > 2$ হওয়া প্রয়োজন। অর্থাৎ জ্বালানীর মধ্যে প্রতিটি নিউট্রন শোষণের জন্য পরবর্তী পর্যায়ে অন্ততঃ দুটি নূতন নিউট্রন পাওয়া প্রয়োজন, যাদের মধ্যে একটি শোষিত হয়ে বিভাজন উৎপাদন করে শৃংখল-বিক্রিয়া চালু রাখে। অপরটি আচ্ছাদনের মধ্যে শোষিত হয়ে নূতন বিভাজনীয় পদার্থ ($U^{233}$ বা $Pu^{239}$) উৎপন্ন করে। বিশুদ্ধ $U^{235}$ জ্বালানী হিসাবে ব্যবহার করলে তাপীয় নিউট্রনের ক্ষেত্রে পাওয়া যায়

$$\eta = \nu . \frac{\sigma_{1f}}{\sigma_{1a}} = 2{\cdot}5 \times \frac{580}{690} = 2{\cdot}1$$

অনুরূপে বিশুদ্ধ $Pu^{239}$ জ্বালানী এবং তাপীয় নিউট্রনের ক্ষেত্রে $\eta = 2{\cdot}1$ পাওয়া যায়। অর্থাৎ দুই ক্ষেত্রেই $\eta$ সংখ্যাটির মান 2 অপেক্ষা সামান্য বেশী হয়। যেহেতু বিক্রিয়কের মধ্যে অন্যান্য নানাভাবে নিউট্রন শোষিত হতে পারে, অতএব উপরোক্ত দুই ক্ষেত্রেই প্রজননের সম্ভাবনা খুবই কম। অপরপক্ষে দ্রুতগতি নিউট্রন এবং বিশুদ্ধ $Pu^{239}$ জ্বালানী ব্যবহার করলে $\eta = 2{\cdot}6$ পাওয়া যায়। স্পষ্টতঃ এক্ষেত্রে প্রজনন ঘটান সহজতর হয়।

এখানে উল্লেখযোগ্য যে $U^{233}$ জ্বালানী এবং তাপীয় নিউট্রনের ক্ষেত্রে $\eta = 2{\cdot}33$ হয়। অর্থাৎ এক্ষেত্রে 'তাপীয় প্রজনন' (Thermal Breeding) সম্ভব হতে পারে। আমাদের দেশে প্রচুর পরিমাণে থোরিয়াম পাওয়া যায়। যদি তার থেকে $U^{233}$ জ্বালানী উৎপাদন করা যায় এবং এই জ্বালানী ব্যবহার করে প্রজনক বিক্রিয়ক নির্মাণ করা যায় তাহলে আমাদের দেশে পরমাণবিক জ্বালানীর সমস্যা দূরীভূত হতে পারে। এ সম্বন্ধে ভারতীয় পরমাণবিক শক্তি সংস্থার উদ্যোগে গবেষণা চলছে।

কেন্দ্রকীয় বিক্রিয়ক বর্তমানে নানারূপ কাজে ব্যবহৃত হয়। বিভিন্ন প্রকার গবেষণার কাজে ব্যবহৃত বিক্রিয়ককে বলা হয় 'গবেষণা-বিক্রিয়ক' (Research Reactor)। পদার্থবিদ্যা, রসায়ন, শারীরবৃত্ত প্রভৃতি নানা বিভাগে গবেষণার কাজে বিক্রিয়কের ব্যবহার বর্তমানে বহুল প্রচলিত। $(n, \gamma)$ বা অন্যান্য প্রকার কেন্দ্রক বিক্রিয়ার দ্বারা নানারূপ তেজস্ক্রিয় পদার্থ উৎপাদনের কাজেও বিক্রিয়কের ব্যবহার খুব সুবিধাজনক। বিক্রিয়কের মধ্যে

সব সময় প্রচুর সংখ্যক নিউট্রন থাকে। সুতরাং এর মধ্যে স্থাপিত যে কোন পদার্থের উপরে নিউট্রন বর্ষিত হতে থাকবে। ফলে সেগুলির মধ্যে নানারূপ কেন্দ্রক বিক্রিয়া অনুষ্ঠিত হবে। তাছাড়া নিউট্রন, $\gamma$-রশ্মি প্রভৃতি বর্ষণের ফলে বিভিন্ন পদার্থ কীরূপ ক্ষতিগ্রস্ত হয় বা জীবকোষের কীরূপ পরিবর্তন হয়, তাও বিক্রিয়কের সাহায্যে পর্যবেক্ষণ করা সম্ভব।

আমাদের দেশে বোম্বাই শহরে 'ভাবা পরমাণবিক গবেষণা কেন্দ্রে' (Bhabha Atomic Research Centre) কয়েকটি গবেষণা বিক্রিয়ক স্থাপিত করা হয়েছে। এদের মধ্যে একটি 'সন্তরণ-জলাশয়' (Swimming Pool) জাতীয় বিক্রিয়ক। অপরটি ভারী জল দ্বারা নিয়ন্ত্রিত বিক্রিয়ক।

বৈদ্যুতিক শক্তি উৎপাদনের কাজে বিক্রিয়কের ব্যবহার বর্তমানে সুপরিজ্ঞাত। ১৯৪২ সালে ফের্মি যে প্রথম কেন্দ্রকীয় বিক্রিয়ক নির্মাণ করেন, তাতে মাত্র 200 ওয়াট হারে শক্তি উৎপন্ন হয়। পরবর্তী যুগে বিক্রিয়ক শিল্প-বিজ্ঞানের প্রভূত উন্নতি সাধনের ফলে বর্তমানে পৃথিবীর বিভিন্ন দেশে কেন্দ্রকীয় বিক্রিয়কের সাহায্যে প্রচুর পরিমাণে বৈদ্যুতিক শক্তি উৎপন্ন করা হয়। ইংল্যাণ্ড এবং রাশিয়া হচ্ছে এ বিষয়ে পথিকৃৎ। ইংল্যাণ্ডের ক্যাল্‌ডার হল কেন্দ্রকীয় বিদ্যুৎ উৎপাদন কেন্দ্রে কয়েকটি বিশাল প্রাকৃতিক ইউরেনিয়াম-গ্র্যাফাইট বিক্রিয়কের সাহায্যে প্রায় 180 মেগাওয়াট বৈদ্যুতিক ক্ষমতা উৎপন্ন করা হয়। এই বিদ্যুৎ উৎপাদন কেন্দ্রটি ১৯৫৬ সাল থেকে চালু আছে। কেন্দ্রকীয় শক্তি থেকে ইংল্যাণ্ডে মোট উৎপন্ন বৈদ্যুতিক ক্ষমতার পরিমাণ বর্তমানে প্রায় 3 মিলিয়ন কিলোওয়াট। ভারতবর্ষেও সম্প্রতি মহারাষ্ট্র রাজ্যে তারাপুর নামক স্থানে একটি কেন্দ্রকীয় বিদ্যুৎ উৎপাদন কেন্দ্র চালু করা হয়েছে। এই কেন্দ্রে ভারী জল দ্বারা নিয়ন্ত্রিত কেন্দ্রকীয় বিক্রিয়ক ব্যবহার করা হয়। জ্বালানী হিসাবে অল্প পরিমাণে $U^{235}$ সমৃদ্ধ (Slightly Enriched) ইউরেনিয়াম ব্যবহার করা হয়। উৎপন্ন ক্ষমতার পরিমাণ হচ্ছে 400 মেগাওয়াট। তাছাড়া রাজস্থানে এবং তামিলনাড়ু প্রদেশের কলপক্কম্‌ নামক স্থানে একটি করে কেন্দ্রকীয় বিদ্যুৎ উৎপাদন কেন্দ্র স্থাপনের পরিকল্পনা করা হয়েছে।

জাহাজ, ডুবো-জাহাজ প্রভৃতি চালনার কাজেও বর্তমানে কেন্দ্রকীয় বিক্রিয়ক ব্যবহার করা হচ্ছে। আমেরিকা এবং রাশিয়া এই পথে বিশেষভাবে অগ্রণী।

## 19·10 : বিকিরণ জনিত ক্ষতি

কেন্দ্রকীয় বিক্রিয়ক নির্মাণ এবং পরিচালনার সময়ে বিক্রিয়কের মধ্যে উৎপন্ন নানারূপ কেন্দ্রকীয় বিকিরণের প্রভাবে মনুষ্য জীবন এবং পারিপার্শ্বিকের নানাবিধ ক্ষতির সম্ভাবনা থাকে। বিক্রিয়কের মধ্যে সাধারণতঃ নিউট্রন এবং বিভাজন-খণ্ড উৎপন্ন হয়। বিভাজন-খণ্ডগুলি তেজস্ক্রিয় হয় এবং এগুলি থেকে $\beta$ ও $\gamma$ রশ্মি নিঃসৃত হয়। নিউট্রন সহ এইসব বিকিরণ মানুষের বা অন্যান্য প্রাণীর দেহের পক্ষে বিশেষ ক্ষতিকারক। বস্তুতঃ সর্বপ্রকার উচ্চশক্তি বিকিরণই প্রাণীদেহের পক্ষে ক্ষতিকারক। তেজস্ক্রিয় বিকিরণ ছাড়াও এর মধ্যে পড়ে X-রশ্মি এবং বিভিন্ন ত্বরণযন্ত্র (Accelerators) থেকে প্রাপ্ত উচ্চশক্তি আহিত কণিকাসমূহ।

বিভাজন-খণ্ডগুলি যদি দীর্ঘ অর্ধজীবনকাল সম্পন্ন হয় তাহলে সেগুলি থেকে নিঃসৃত বিকিরণ বহুদিন ধরে ক্ষতি সাধন করতে থাকবে। এছাড়া গাছপালা শস্য এবং নানাবিধ পারিপার্শ্বিক পদার্থও এইসব বিকিরণ দ্বারা ক্ষতিগ্রস্ত হতে পারে। সেইজন্য বিক্রিয়ক পরিচালনা কালে বিশেষ সাবধানতা অবলম্বন করা প্রয়োজন, যাতে নিউট্রন বা বিভাজন-খণ্ডগুলি কোনক্রমে বিক্রিয়ক থেকে নির্গত না হতে পারে।

যে সব জটিল অণুর দ্বারা জীবকোষসমূহ গঠিত, উচ্চশক্তি বিকিরণের প্রভাবে সেগুলি বিশ্লিষ্ট হয়, যার ফলে এই সব জীবকোষ বিনষ্ট হয়। প্রাণী-দেহের মধ্য দিয়ে পরিভ্রমণ কালে উচ্চশক্তি বিকিরণ যে আয়ন উৎপন্ন করে তার ফলেই জীবকোষগুলি বিনষ্ট হয়। বস্তুতঃ কোন বিকিরণের জৈবিক ক্ষতি সাধন ক্ষমতা নির্ভর করে এর আয়ন উৎপাদন হারের উপর। $\alpha$-কণিকার আয়ন উৎপাদন হার অন্যান্য তেজস্ক্রিয় বিকিরণের তুলনায় খুব বেশী। সুতরাং যদি কোন $\alpha$-নিঃসারক তেজস্ক্রিয় পদার্থ প্রাণীদেহের অভ্যন্তরে প্রবেশ করে, তাহলে নিঃসৃত $\alpha$-কণিকাসমূহ প্রচুর ক্ষতি সাধন করতে পারে। তেজস্ক্রিয়তা আবিষ্কারের পরে প্রথম যুগে ইউরেনিয়াম, থোরিয়াম প্রভৃতি শ্রেণীর মধ্যে বর্তমান তেজস্ক্রিয় রেডন গ্যাস অনেক সময় নিঃশ্বাসের সংগে গবেষণাগারের কর্মীদের শরীরের অভ্যন্তরে প্রবেশ করে এইভাবে গুরুতর ক্ষতি সাধন করত। পরবর্তী যুগে অবশ্য এ বিষয়ে সবিশেষ সাবধানতা অবলম্বন করা হয়। তাছাড়া ইউরেনিয়াম প্রভৃতি ধাতুর খনির মধ্যে কার্যরত শ্রমিকদের দেহেও রেডন গ্যাস নিঃসৃত $\alpha$-কণিকার ক্ষতিকারক ক্রিয়া আগেকার দিনে প্রায়ই পরিলক্ষিত হত। বস্তুতঃ ইউরেনিয়াম বা থোরিয়াম খনির মধ্যে

দশ বৎসরের অধিক কাল কর্মরত শ্রমিকদের মধ্যে ফুসফুসের ক্যানসার রোগ খুবই সাধারণ ছিল। বর্তমানে অবশ্য নানাবিধ সাবধানতা অবলম্বন করার ফলে এই ভয়াবহ পরিস্থিতির অবসান ঘটেছে।

$\alpha$-কণিকার ভেদ্যতা খুব কম। সেজন্য $\alpha$-নিঃসারক পদার্থ যদি প্রাণীদেহের অভ্যন্তরে প্রবেশ না করে তাহলে অবশ্য ক্ষতির সম্ভাবনা অপেক্ষাকৃত অনেক কম হয়। অনুরূপে $\beta$-নিঃসারক পদার্থ যদি দেহের অভ্যন্তরে প্রবেশ না করে তাহলে প্রাণীদেহের বিশেষ ক্ষতি হয় না। কারণ $\beta$-কণিকার ভেদ্যতা $\alpha$-কণিকার তুলনায় বেশী হলেও এরা ত্বক ভেদ করে দেহের অভ্যন্তরে বেশী দূর পর্যন্ত প্রবেশ করতে পারে না। তাছাড়া $\alpha$-কণিকার তুলনায় $\beta$-কণিকার আয়নন ক্ষমতা অনেক কম হওয়ার জন্য $\beta$-নিঃসারক পদার্থ দেহের মধ্যে প্রবেশ করলেও $\alpha$-কণিকার তুলনায় ক্ষতির পরিমাণ অপেক্ষাকৃত কম হয়।

নিউট্রনের নিজস্ব কোন আয়নন ক্ষমতা নাই। কিন্তু শরীরের মধ্যে $(n,\gamma)$, $(n,p)$ প্রভৃতি বিভিন্ন প্রকার কেন্দ্রক বিক্রিয়া সংঘটিত করার ফলে নিউট্রনের দ্বারাও প্রাণীদেহের প্রভূত ক্ষতি হতে পারে। জীবকোষসমূহের মধ্যে যথেষ্ট পরিমাণে হাইড্রোজেন পরমাণু বর্তমান থাকে। মন্থরগতি নিউট্রন সমূহ এই সব হাইড্রোজেন পরমাণুর কেন্দ্রক, অর্থাৎ প্রোটন দ্বারা শোষিত হয়, যার ফলে, প্রায় 2·23 মি-ই-ভো শক্তি সম্পন্ন $\gamma$-রশ্মি নিঃসৃত হয়। এইসব $\gamma$-ফোটন দেহের ভিতরকার বিভিন্ন তন্তুকে (Tissues) ক্ষতিগ্রস্ত করে। তাছাড়া নিউট্রনগুলি জীবকোষের মধ্যে প্রভূত পরিমাণে বর্তমান নাইট্রোজেন পরমাণুর কেন্দ্রকের সংগে $(n,p)$ বিক্রিয়া সংঘটিত করে উচ্চশক্তি প্রোটন নিঃসৃত করে। এই সব প্রোটন $\alpha$-কণিকার মত খুব উচ্চহারে আয়ন উৎপন্ন করে, যার ফলে এদের ক্রিয়ায় প্রাণীদেহের যথেষ্ট ক্ষতি হয়। তাছাড়া উচ্চশক্তি নিউট্রন জীবকোষের অভ্যন্তরস্থ হাইড্রোজেন কেন্দ্রকগুলিকে প্রতিক্ষিপ্ত (Recoil) করে, যার ফলে সেগুলিও উচ্চহারে আয়ন উৎপন্ন করে জীবকোষ গুলিকে বিনষ্ট করে।

X-রশ্মি এবং $\gamma$-রশ্মিও প্রাণীদেহের যথেষ্ট অনিষ্ট সাধন করে। কোন কোন ক্ষেত্রে অবশ্য এই জাতীয় বিকিরণ দ্বারা দেহ মধ্যস্থ ক্যানসার রোগগ্রস্ত কোষসমূহকে বিনষ্ট করে এই রোগের চিকিৎসা করা হয়।

অল্প মাত্রায় আপতিত বিকিরণ প্রাণীদেহের খুব বেশী ক্ষতি করে না। বস্তুতঃ মহাজাগতিক রশ্মি (Cosmic Rays) এবং ভূত্বকের মধ্যে বর্তমান

তেজস্ক্রিয় পদার্থ নিঃসৃত বিকিরণসমূহ আমাদের দেহের উপরে সর্বদা আপতিত হয়। কিন্তু এদের তীব্রতা এমন যে তা আমাদের স্বাস্থ্যের পক্ষে বিশেষ ক্ষতিকারক হয় না। অপরপক্ষে খুব উচ্চ তীব্রতা সম্পন্ন কেন্দ্রকীয় বিকিরণ যদি অনেকক্ষণ ধরে বর্ষিত হয়, তাহলে প্রাণীদেহের মারাত্মক অনিষ্ট হতে পারে। সাধারণতঃ এ ক্ষেত্রে রক্তহীনতা, ক্ষতিকারক টিউমার, লিউকেমিয়া, ছানি প্রভৃতি নানারূপ রোগের সৃষ্টি হতে পারে। তাছাড়া জীবকোষের পরিব্যক্তির (Mutation) হারও খুব বৃদ্ধি পায়। দীর্ঘকাল ব্যাপী উচ্চ তীব্রতা সম্পন্ন বিকিরণের দ্বারা যদি প্রাণীদেহ উদ্‌ভাসিত (Exposed) হয়, তাহলে প্রায় সংগে সংগেই বমনের ভাব হতে থাকে ; তাছাড়া ক্ষুধামান্দ্য, অতিসার প্রভৃতি রোগের লক্ষণও দেখা যায়।

কেন্দ্রকীয় বিকিরণ যখন দেহের উপরে আপতিত হয় তখন কোনরূপ বেদনা অনুভব করা যায় না। ফলে জানা না থাকলে দেহের উপরে যে বিকিরণ বর্ষিত হচ্ছে তা বোধগম্য হয় না। সেজন্য তেজস্ক্রিয় পদার্থ নিয়ে পরীক্ষা করার সময়ে অথবা ত্বরণযন্ত্র বা কেন্দ্রকীয় বিক্রিয়ক পরিচালনা করার সময়ে বিভিন্ন প্রকার বিকিরণ নির্দেশক যন্ত্রের দ্বারা নিঃসৃত বিকিরণের তীব্রতার প্রতি লক্ষ্য রাখা আবশ্যক।

কেন্দ্রকীয় বিক্রিয়ক পরিচালনা করার সময়ে এবং এর মধ্যে ব্যবহৃত বিভিন্ন পদার্থ নিয়ে কাজ করার সময়ে অতি তীব্র বিকিরণের সম্মুখীন হওয়ার সম্ভাবনা। সেজন্য বিক্রিয়কগুলি সাধারণতঃ স্থূল কংক্রীটের প্রাচীর দ্বারা বেষ্টিত থাকে। বিক্রিয়কের মধ্যে প্রচুর পরিমাণে ইউরেনিয়াম বা থোরিয়াম ব্যবহৃত হয়, যাদের নিজস্ব তেজস্ক্রিয়তার পরিমাণ সমধিক। তাছাড়া এদের মধ্যে উৎপন্ন বিভাজন-খণ্ডগুলিও প্রচণ্ড তেজস্ক্রিয় হয়। মাঝে মাঝে এগুলিকে কেন্দ্রকীয় জ্বালানী (Nuclear Fuel) থেকে রাসায়নিক পদ্ধতিতে পৃথকীকৃত করা প্রয়োজন হয়। তা না হলে বিক্রিয়ক ঠিক ভাবে কাজ করতে পারে না। কারণ এদের মধ্যে কোন কোনটির নিউট্রন শোষণ ক্ষমতা খুব বেশী। যে সব বিভাজন-খণ্ড বা তাদের বিঘটনের ফলে সৃষ্ট পদার্থগুলির অর্ধজীবনকাল খুব দীর্ঘ হয় সেগুলিকে পৃথকীকৃত করার সময়ে বিশেষ সাবধানতা অবলম্বন করা প্রয়োজন, যাতে কর্মীবৃন্দ এদের থেকে নিঃসৃত তেজস্ক্রিয় বিকিরণ দ্বারা ক্ষতিগ্রস্ত না হন। সাধারণতঃ নানারূপ জটিল, দূর-নিয়ন্ত্রক (Remote Control) যন্ত্র ব্যবহার করে এই সব কাজ অনুষ্ঠিত করা হয়।

## 19·11 : পরমাণবিক বোমা

(19·8) অনুচ্ছেদে বলা হয়েছে যে কেন্দ্রকীয় শৃংখল-বিক্রিয়া কালে উৎপন্ন মোট শক্তি যদি অল্প সময়ের মধ্যে নিঃসৃত হয় তাহলে বিস্ফোরণ ঘটতে পারে। পরমাণবিক বোমার মধ্যে সমৃদ্ধ (Enriched) $U^{235}$ আইসোটোপ ব্যবহার করা হয়। সাধারণতঃ ব্যাপন (Diffusion) পদ্ধতিতে ইউরেনিয়ামের গ্যাসীয় যৌগ $UF_6$ থেকে $U^{235}$ আইসোটোপ পৃথকীকৃত করা হয়। বোমার মধ্যে ব্যবহৃত ইউরেনিয়াম অত্যন্ত বিশুদ্ধ হওয়া প্রয়োজন, কারণ তা না হলে অপদ্রব্যের (Impurity) মধ্যে কিছু নিউট্রন শোষিত হয়ে নষ্ট হবে, যার ফলে শৃংখল-বিক্রিয়া চালু রাখা শক্ত হতে পারে। কেন্দ্রকীয় বিক্রিয়কের তুলনায় পরমাণবিক বোমা আয়তনে অনেক ছোট হয়। ফলে কেন্দ্রক বিভাজনের দ্বারা উৎপন্ন নিউট্রন সমূহের একটা বৃহদংশ বোমার ভিতর থেকে নির্গত হয়ে যায়। বস্তুতঃ বোমাটি একটা ক্ষুদ্রতম সংকট আয়তন (Critical Size) অপেক্ষা বৃহত্তর না হলে শৃংখল-বিক্রিয়া চালিত রাখা সম্ভব হয় না, অর্থাৎ বিস্ফোরণ ঘটতে পারে না।

$U^{235}$ কেন্দ্রকগুলির মন্থরগতি নিউট্রনের দ্বারা বিভাজিত হওয়ার সম্ভাব্যতা অপেক্ষাকৃত অনেক বেশী হলেও পরমাণবিক বোমার মধ্যে উৎপন্ন বিভাজন নিউট্রনগুলিকে মন্থরগতি করবার জন্য নিয়ন্ত্রক ব্যবহার করা হয় না। নিয়ন্ত্রক ব্যবহার করলে বোমার আয়তন এবং ওজন অতিরিক্ত বেশী হয়ে যায়। তাছাড়া এক্ষেত্রে বিভাজনের ফলে উৎপন্ন শক্তি যথেষ্ট দ্রুত নিঃসৃত হতে পারে না। সেজন্য পরমাণবিক বোমার মধ্যে দ্রুতগতি নিউট্রন দ্বারাই বিভাজন উৎপন্ন করা হয়।

সাধারণতঃ 'সংকট আয়তন অপেক্ষা ক্ষুদ্রতর কয়েকটি $U^{235}$ খণ্ড খুব দ্রুত একত্রিত করে সংকটোত্তর আয়তন (Super Critical Size) সৃষ্টি করা হয়, যার ফলে বিস্ফোরণ ঘটে।

ইউরেনিয়ামোত্তর মৌল প্লুটোনিয়ামের $Pu^{239}$ আইসোটোপ ব্যবহার করেও পরমাণবিক বোমা নির্মাণ করা যায়। প্লুটোনিয়াম পৃথকীকরণের সুবিধার জন্য এইরূপ বোমা নির্মাণ করা অপেক্ষাকৃত সহজতর। সম্প্রতি আমাদের দেশে রাজস্থানে যে পরমাণবিক বিস্ফোরণ ঘটান হয় তার মধ্যে $Pu^{239}$ ব্যবহার করা হয়।

এখানে উল্লেখযোগ্য যে 'পরমাণবিক শক্তি' বা 'পরমাণবিক বোমা'

নামগুলি কিছুটা বিভ্রান্তিকারক। কারণ যে কোন রাসায়নিক পদ্ধতিই প্রকৃতপক্ষে পরমাণবিক পদ্ধতি; পরমাণুসমূহের সংযোজন বা বিয়োজনের ফলেই রাসায়নিক বিক্রিয়া সংঘটিত হয় এবং রাসায়নিক শক্তি নিঃসৃত হয়। সুতরাং সাধারণ রাসায়নিক বোমার বিস্ফোরণের ফলে অথবা যে কোন রাসায়নিক বিক্রিয়া কালে ( যথা কয়লা দহনের সময়ে ) যে শক্তি নিঃসৃত হয় তা হচ্ছে প্রকৃতপক্ষে পরমাণবিক শক্তি। সুতরাং রাসায়নিক বোমাও হচ্ছে প্রকৃতপক্ষে পরমাণবিক বোমা। কেন্দ্রকীয় বিভাজনের দ্বারা যে শক্তি নিঃসৃত হয় তার প্রকৃত নাম হওয়া উচিত কেন্দ্রকীয় শক্তি (Nuclear Energy) এবং $U^{235}$ বা $Pu^{239}$ ব্যবহার করে যে বোমা নির্মিত হয় তার প্রকৃত নাম হওয়া উচিত কেন্দ্রকীয় বোমা (Nuclear Bomb)।

প্রথম যে পরমাণবিক বোমা দ্বিতীয় বিশ্বযুদ্ধের প্রায় শেষভাগে সম্পূর্ণ অযথাভাবে জাপানের হিরোশিমা এবং নাগাসাকি নামক দুটি শহরের উপর আমেরিকা কর্তৃক বর্ষিত হয় তার ফলে লক্ষ লক্ষ লোক অধ্যুষিত এই শহর দুটি সম্পূর্ণ ধ্বংস হয়ে যায় এবং বহু লক্ষ ব্যক্তির প্রাণহানি হয়। তাছাড়া বহু লক্ষ ব্যক্তি বিকলাংগ হয়ে যান এবং তেজস্ক্রিয় বিকিরণের প্রভাবে নানারূপ দুরারোগ্য রোগে আক্রান্ত হন। এই বোমা দুটির বিস্ফোরণ ক্ষমতা প্রায় 20,000 টন টি, এন্, টি (T. N. T.) নামক রাসায়নিক বিস্ফোরকের সমান ছিল, যদিও এদের মধ্যে মাত্র কয়েক কিলোগ্রাম কেন্দ্রকীয় জ্বালানী ব্যবহার করা হয়। পরবর্তী যুগে আরও অনেক উচ্চতর বিস্ফোরণ ক্ষমতা সম্পন্ন পরমাণবিক বোমা নির্মিত হয়েছে। বর্তমানে আন্তর্জাতিক ক্ষেত্রে পরমাণবিক বোমা নিয়ন্ত্রণের নানারূপ প্রচেষ্টা চলছে।

## 19·12 : ইউরেনিয়ামোত্তর মৌল

(19·1) অনুচ্ছেদে ফের্মি ও তাঁর সহযোগীবৃন্দ কর্তৃক ইউরেনিয়ামের উপর মন্থরগতি নিউট্রন বর্ষণ দ্বারা ইউরেনিয়ামোত্তর মৌল (Transuranic Elements) উৎপন্ন করার প্রচেষ্টার কথা উল্লেখ করা হয়েছে। তাঁদের এই প্রচেষ্টা অবশ্য ফলপ্রসূ হয়নি। পরে ১৯৪০ সালে আমেরিকান বিজ্ঞানী-দ্বয় ম্যাক্‌মিলান এবং এবেল্‌সন (McMillan and Abelson) উপরোক্ত পদ্ধতিতে সর্বপ্রথম ইউরেনিয়ামোত্তর মৌল নেপচুনিয়াম আবিষ্কার করেন।

(19·2) সারণীতে এ পর্যন্ত উৎপন্ন ইউরেনিয়ামোত্তর মৌলসমূহের তালিকা লিপিবদ্ধ করা হয়েছে।

**সারণী—19·2**

| $Z$ | মৌল |
|---|---|
| 93 | নেপচুনিয়াম (Neptunium; Np) |
| 94 | প্লুটোনিয়াম (Plutonium; Pu) |
| 95 | আমেরিশিয়াম (Americium ; Am) |
| 96 | কিউরিয়াম (Curium; Cm) |
| 97 | বার্ক্লিয়াম (Berkelium; Bk) |
| 98 | ক্যালিফর্নিয়াম (Californium; Cf) |
| 99 | আইনষ্টাইনিয়াম (Einsteinium; Es) |
| 100 | ফের্মিয়াম (Fermium; Fm) |
| 101 | মেণ্ডেলেভিয়াম (Mendelevium ; Mv) |
| 102 | নোবেলিয়াম (Nobelium; No) |
| 103 | লরেন্সিয়াম (Lawrencium ; Lw) |
| 104 | কুর্চাটোভিয়াম (Kurchatovium) |
| 105 | হানিয়াম (Hahnium) |

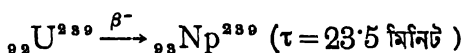
বিভিন্ন ইউরেনিয়ামোত্তর মৌলের কয়েকটি বিশেষ বিশেষ আইসোটোপ উৎপাদনের পদ্ধতি নিম্নে আলোচনা করা হয়েছে।

**(ক)** নেপচুনিয়াম ($Z=93$)

$U^{238}$ আইসোটোপের দ্বারা অনুনাদী নিউট্রন আহরণের (Resonance Neutron Capture) ফলে $U^{239}$ আইসোটোপ উৎপন্ন হয়ঃ

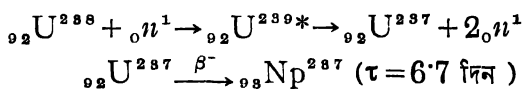
$$_{92}U^{238}+{}_0n^1 \rightarrow {}_{92}U^{239*} \rightarrow {}_{92}U^{239}+\gamma$$

$U^{239}$ আইসোটোপটি $\beta^-$ বিঘটনশীল হয়। এই বিঘটনের ফলে $Z=93$ পরমাণবিক সংখ্যা সম্পন্ন প্রথম ইউরেনিয়ামোত্তর মৌল নেপচু-নিয়ামের (Neptunium) $Np^{239}$ আইসোটোপ সৃষ্ট হয়ঃ

$$_{92}U^{239} \xrightarrow{\beta^-} {}_{93}Np^{239} \quad (\tau=23{\cdot}5 \text{ মিনিট })$$

ম্যাক্‌মিলান এবং এবেল্‌সন কণামাত্রিক পরিমাণে (Trace Amount) উৎপন্ন এই নূতন তেজস্ক্রিয় পদার্থ রাসায়নিক পদ্ধতিতে পৃথকীকৃত করে প্রমাণ করেন যে এর রাসায়নিক ধর্ম ইউরেনিয়াম থেকে স্বতন্ত্র।

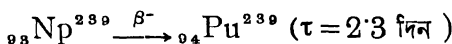
আবার উচ্চশক্তি নিউট্রন দ্বারা উৎপন্ন $(n,2n)$ প্রক্রিয়ার সাহায্যে $Np^{237}$ পাওয়া যায়

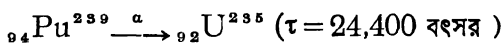
$$_{92}U^{238} + {_0n^1} \rightarrow {_{92}U^{239*}} \rightarrow {_{92}U^{237}} + 2{_0n^1}$$

$$_{92}U^{237} \xrightarrow{\beta^-} {_{93}Np^{237}} \ (\tau = 6{\cdot}7 \text{ দিন })$$

$Np^{237}$ আইসোটোপ $\alpha$-বিঘটনশীল হয় $(\tau = 2{\cdot}2 \times 10^6$ বৎসর )।

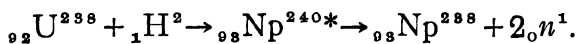
**(খ)** প্লুটোনিয়াম $(Z = 94)$

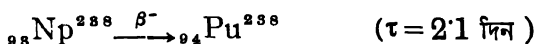
$Np^{239}$ আইসোটোপটি তেজস্ক্রিয় হয়। $\beta^-$ বিঘটনের ফলে সেটি $Z = 94$ পরমাণবিক সংখ্যা সম্পন্ন প্লুটোনিয়াম (Plutonium) § মৌলের $Pu^{239}$ আইসোটোপে রূপান্তরিত হয় ঃ

$$_{93}Np^{239} \xrightarrow{\beta^-} {_{94}Pu^{239}} \ (\tau = 2{\cdot}3 \text{ দিন })$$

$Pu^{239}$ আইসোটোপটিও তেজস্ক্রিয়। এর অর্ধজীবনকাল খুব দীর্ঘ এবং এটি $\alpha$-বিঘটনশীল হয় ঃ

$$_{94}Pu^{239} \xrightarrow{\alpha} {_{92}U^{235}} \ (\tau = 24{,}400 \text{ বৎসর })$$

পরমাণবিক বোমা নির্মাণের কাজে $Pu^{239}$ আইসোটোপের গুরুত্বপূর্ণ ভূমিকার কথা (19·11) অনুচ্ছেদে উল্লেখ করা হয়েছে।

১৯৪০ সালের শেষের দিকে ম্যাক্‌মিলান এবং তাঁর দুজন সহকর্মী $U^{238}$ আইসোটোপের উপরে $(d,2n)$ বিক্রিয়া অনুষ্ঠিত করে প্লুটোনিয়ামের আর একটি আইসোটোপ $Pu^{238}$ আবিষ্কার করেন ;

$$_{92}U^{238} + {_1H^2} \rightarrow {_{93}Np^{240*}} \rightarrow {_{93}Np^{238}} + 2{_0n^1}.$$

$Np^{238}$ আইসোটোপটি $\beta^-$ বিঘটনের ফলে $Pu^{238}$ আইসোটোপে রূপান্তরিত হয় ঃ

$$_{93}Np^{238} \xrightarrow{\beta^-} {_{94}Pu^{238}} \qquad (\tau = 2{\cdot}1 \text{ দিন })$$

$Pu^{238}$ আইসোটোপ $\alpha$-বিঘটনশীল $(\tau = 90$ বৎসর )। এই আইসোটোপের সাহায্যে প্রাথমিক যুগে প্লুটোনিয়াম মৌলের রাসায়নিক ধর্মাবলী নিরূপিত হয়। পরবর্তী যুগে নেপ্‌চুনিয়াম ও প্লুটোনিয়ামের আরও অনেক আইসোটোপ উৎপন্ন করা হয়।

§ বিঃ দ্রঃ। সৌরমণ্ডলে ইউরেনাসের পরবর্তী দুটি গ্রহ নেপচুন ও প্লুটোর নামানুসারে ইউরেনিয়ামের পরবর্তী মৌল দুটির নাম দেওয়া হয় নেপচুনিয়াম এবং প্লুটোনিয়াম।

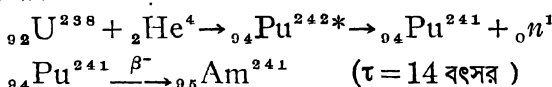
১৯৪৪ সালের পর থেকে প্লুটোনিয়ামের পরে আরও এগারটি ইউরেনিয়ামোত্তর মৌল আবিষ্কৃত হয়েছে।

এই মৌলগুলির প্রত্যেকটির একাধিক আইসোটোপ উৎপন্ন করা হয়েছে। সেগুলি সবই তেজস্ক্রিয়। এদের মধ্যে অনেকগুলি উৎপন্ন করা হয় ডয়টেরন, α-কণিকা প্রভৃতি বর্ষণের দ্বারা। এদের মধ্যে কোন কোনটি পরমাণবিক বোমা বিস্ফোরণের ফলে উৎপন্ন ভস্মের মধ্যেও পাওয়া যায়। আইনষ্টাইনিয়াম ($Z=99$) এবং ফের্মিয়াম ($Z=100$) মৌলদুটি সর্বপ্রথম এইরূপ ভস্মের মধ্যেই আবিষ্কৃত হয়।

**(গ)** আমেরিশিয়াম ($Z=95$)

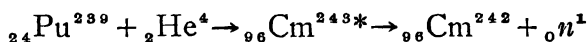
$U^{238}$ আইসোটোপের উপর উচ্চশক্তি α-কণিকা বর্ষণ করে এই মৌলটি উৎপন্ন করা যায়।

$${}_{92}U^{238} + {}_{2}He^{4} \rightarrow {}_{94}Pu^{242*} \rightarrow {}_{94}Pu^{241} + {}_{0}n^{1}$$

$${}_{94}Pu^{241} \xrightarrow{\beta^-} {}_{95}Am^{241} \qquad (\tau = 14 \text{ বৎসর })$$

$Am^{241}$ আইসোটোপ α-বিঘটনশীল হয় ($\tau = 500$ বৎসর )।

**(ঘ)** কিউরিয়াম ($Z=96$)

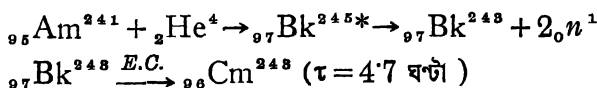
$Pu^{239}$ থেকে উচ্চশক্তি α-কণিকার ক্রিয়ায় এই মৌল উৎপন্ন করা যায়ঃ

$${}_{24}Pu^{239} + {}_{2}He^{4} \rightarrow {}_{96}Cm^{243*} \rightarrow {}_{96}Cm^{242} + {}_{0}n^{1}$$

α-বিঘটনশীল $Cm^{242}$ আইসোটোপের $\tau = 162$ দিন হয়।

**(ঙ)** বার্ক্‌লিয়াম ($Z=97$)

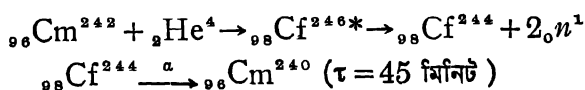
পাঁচশত বৎসর অর্ধজীবনকাল সম্পন্ন $Am^{241}$ থেকে উচ্চশক্তি α-কণিকার সাহায্যে $Bk^{243}$ উৎপন্ন করা হয়ঃ

$${}_{95}Am^{241} + {}_{2}He^{4} \rightarrow {}_{97}Bk^{245*} \rightarrow {}_{97}Bk^{243} + 2{}_{0}n^{1}$$

$${}_{97}Bk^{243} \xrightarrow{E.C.} {}_{96}Cm^{243} \; (\tau = 4{\cdot}7 \text{ ঘণ্টা })$$

**(চ)** ক্যালিফর্নিয়াম ($Z=98$)

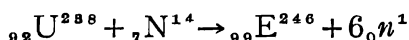
$Cm^{242}$ থেকে α-বর্ষণ করে এই মৌল উৎপন্ন করা যায়ঃ

$${}_{96}Cm^{242} + {}_{2}He^{4} \rightarrow {}_{98}Cf^{246*} \rightarrow {}_{98}Cf^{244} + 2{}_{0}n^{1}$$

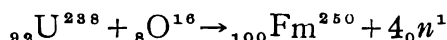
$${}_{98}Cf^{244} \xrightarrow{\alpha} {}_{96}Cm^{240} \; (\tau = 45 \text{ মিনিট })$$

এর পরবর্তী মৌলগুলি উৎপন্ন করার জন্য সাইক্লোট্রন দ্বারা ত্বরিত অপেক্ষাকৃত গুরুভার সম্পূর্ণ আয়নিত পরমাণু, অর্থাৎ পরমাণু কেন্দ্রক ব্যবহার করা হয়।

**(ছ)** আইনষ্টাইনিয়াম ($Z=99$)

নাইট্রোজেন পরমাণুর সাতটি কক্ষীয় ইলেকট্রন উচ্ছিন্ন করার ফলে সৃষ্ট $N^{14}$ কেন্দ্রক যদি সাইক্লোট্রন দ্বারা উচ্চশক্তি সম্পন্ন করে $U^{238}$ আইসোটোপের উপর বর্ষিত করা হয় তাহলে আইনষ্টাইনিয়াম ($Z=99$) উৎপন্ন হয় ঃ

$$_{92}U^{238}+{}_{7}N^{14}\rightarrow {}_{99}E^{246}+6{}_{0}n^{1}$$

**(জ)** ফের্মিয়াম ($Z=100$)

অনুরূপে $U^{238}$ আইসোটেপের উপর $O^{16}$ কেন্দ্রক বর্ষণ করে পাওয়া যায় ফের্মিয়াম আইসোটোপ $Fm^{250}$ ঃ

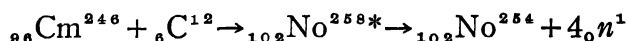
$$_{92}U^{238}+{}_{8}O^{16}\rightarrow {}_{100}Fm^{250}+4{}_{0}n^{1}$$

**(ঝ)** মেণ্ডেলেভিয়াম ($Z=101$)

আইনষ্টাইনিয়াম মৌলের $Es^{253}$ আইসোটেপের উপর α-কণিকা বর্ষণ করে মেণ্ডেলেভিয়াম আইসোটোপ $Mv^{255}$ উৎপন্ন করা যায়।

$$_{99}Es^{253}+{}_{2}He^{4}\rightarrow {}_{101}Mv^{257*}\rightarrow {}_{101}Mv^{256}+{}_{0}n^{1}$$

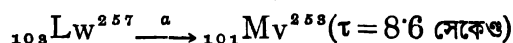
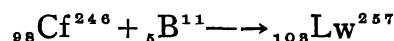
**(ঞ)** নোবেলিয়াম ($Z=102$)

$Cm^{246}$ আইসোটোপের উপর $C^{12}$ কেন্দ্রক বর্ষণ করে নোবেলিয়াম আইসোটোপ $No^{254}$ উৎপন্ন করা হয় ঃ

$$_{96}Cm^{246}+{}_{6}C^{12}\rightarrow {}_{102}No^{258*}\rightarrow {}_{102}No^{254}+4{}_{0}n^{1}$$

**(ট)** লরেন্সিয়াম ($Z=103$)

$Cf^{246}$ থেকে উচ্চশক্তি $B^{11}$ কেন্দ্রক বর্ষণের সাহায্যে লরেন্সিয়াম আইসোটোপ $Lw^{257}$ উৎপন্ন করা যায় ঃ

$$_{98}Cf^{246}+{}_{5}B^{11}\longrightarrow {}_{103}Lw^{257}$$

$$_{103}Lw^{257}\xrightarrow{\alpha}{}_{101}Mv^{253}(\tau=8{\cdot}6 \text{ সেকেণ্ড})$$

**(ঠ)** কুর্চাটোভিয়াম ($Z=104$)

$Pu^{242}$ ($Z=94$) আইসোটোপের উপর উচ্চশক্তি $Ne^{22}$ ($Z=10$) কেন্দ্রক বর্ষণ করে এই মৌল উৎপন্ন করা হয়।

**(ড)** হানিয়াম ($Z = 105$)

$Cf^{249}$ ($Z = 98$) আইসোটোপের উপর উচ্চশক্তি $N^{15}$ ($Z = 7$) কেন্দ্রক বর্ষণ করে এই মৌল উৎপন্ন করা হয়। §

ইউরেনিয়ামোত্তর মৌল ছাড়াও আর কতকগুলি মৌল আছে যাদের অস্তিত্বের কোন নিদর্শন প্রকৃতিতে পাওয়া যায় না। এদের পরমাণবিক সংখ্যা হচ্ছে $Z = 43, 61, 85$ এবং $87$। সাম্প্রতিক কালে সাইক্লোট্রন প্রভৃতি ত্বরণযন্ত্রের সাহায্যে কেন্দ্রক বিক্রিয়া সংঘটিত করে এদের তেজস্ক্রিয় আইসোটোপ উৎপন্ন করা সম্ভব হয়েছে। এই মৌলগুলির নাম দেওয়া হয়েছে যথাক্রমে টেক্‌নিসিয়াম (Tc), প্রমিথিয়াম (Pm), অ্যাস্‌টাটিন (At) এবং ফ্রান্‌সিয়াম (Fr)। এদের মধ্যে অ্যাসটাটিন ($Z = 85$) মৌলটির রাসায়নিক ধর্ম বিভিন্ন হ্যালোজেন মৌলসমূহের অনুরূপ। অপর পক্ষে ফ্রান্‌সিয়াম ($Z = 87$) হচ্ছে একটি ক্ষারীয় মৌল।

**19·13 : কেন্দ্রকীয় সংযোজন ; তাপীয় কেন্দ্রক বিক্রিয়া**

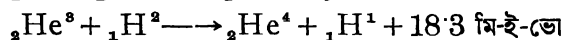
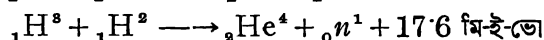
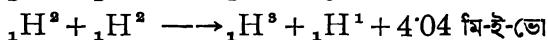
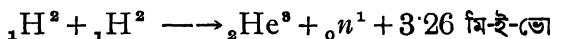
কেন্দ্রক বিভাজনের ফলে নিঃসৃত শক্তি মানব কল্যাণের কাজে পৃথিবীর বিভিন্ন দেশে বর্তমানে প্রভূত পরিমাণে ব্যবহৃত হয়। এছাড়া আরও এক ধরনের কেন্দ্রক বিক্রিয়ার ব্যবহারিক প্রয়োগের দ্বারা কেন্দ্রকীয় শক্তি উৎপাদনের জন্য বর্তমানে সমধিক প্রচেষ্টা চালান হচ্ছে। এই বিক্রিয়াকে 'কেন্দ্রকীয় সংযোজন' (Nuclear Fusion) আখ্যা দেওয়া হয়।

কয়েকটি কার্যোপযোগী কেন্দ্রকীয় সংযোজন বিক্রিয়ার উদাহরণ নিম্নে লিপিবদ্ধ করা হয়েছে :

$${}_1H^2 + {}_1H^2 \longrightarrow {}_2He^3 + {}_0n^1 + 3{\cdot}26 \text{ মি-ই-ভো}$$

$${}_1H^2 + {}_1H^2 \longrightarrow {}_1H^3 + {}_1H^1 + 4{\cdot}04 \text{ মি-ই-ভো}$$

$${}_1H^3 + {}_1H^2 \longrightarrow {}_2He^4 + {}_0n^1 + 17{\cdot}6 \text{ মি-ই-ভো}$$

$${}_2He^3 + {}_1H^2 \longrightarrow {}_2He^4 + {}_1H^1 + 18{\cdot}3 \text{ মি-ই-ভো}$$

(17·12) অনুচ্ছেদে দেখা গেছে যে যখন দুটি খুব হালকা কেন্দ্রক পরস্পরের সংগে সংযুক্ত হয়ে বিক্রিয়া করে তখন প্রচুর পরিমাণ শক্তি নিঃসৃত

---

§ বিঃ দ্রঃ। সম্প্রতি (১৯৭৬ সালে) আমেরিকান বিজ্ঞানী জেন্‌ট্রি ও তাঁর সহযোগীগণ বায়োটাইট অভ্রের মধ্যে $Z = 116$ ও $126$ পরমাণবিক সংখ্যা সম্পন্ন অতি-ভারী (Super Heavy) ইউরেনিয়ামোত্তর পরমাণুর অস্তিত্বের সন্ধান পেয়েছেন। এগুলি $\alpha$-বিঘটনশীল ও এদের অর্ধজীবনকাল $10^{-9}$ সেকেণ্ড মাত্রিক।

হয়। উপরের উদাহরণগুলি থেকে দেখা যায় যে সংযোজনের ফলে সৃষ্ট কেন্দ্রকগুলির মধ্যে অন্ততঃ একটি আদি কেন্দ্রকগুলির তুলনায় উচ্চতর ভর সম্পন্ন হয়। উদাহরণস্বরূপ দুটি ডয়টেরনের সংযোজনের ( $d-d$ বিক্রিয়া ) ফলে হয় একটি $H^3$ ( অর্থাৎ ট্রাইটন বা ট্রিটিয়াম কেন্দ্রক ) আর না হয় একটি $He^3$ কেন্দ্রক উৎপন্ন হয়। উভয় ক্ষেত্রেই প্রায় 4 মি-ই-ভো শক্তি নিঃসৃত হয়। আবার ডয়টরেন এবং ট্রিটিয়ামের সংযোজনের ( $d-t$ বিক্রিয়া ) ফলে $He^4$ এবং নিউট্রন উৎপন্ন হয়। এক্ষেত্রে প্রায় 17·6 মি-ই-ভো শক্তি নিঃসৃত হয়।

আপতিত ডয়টেরনের শক্তি যথেষ্ট উচ্চ না হলে ডয়টেরন এবং ট্রাইটন (Triton) কুলম্ব বিকর্ষণী বল কাটিয়ে পরস্পরের খুব নিকট সান্নিধ্যে এসে কেন্দ্রক বিক্রিয়া অনুষ্ঠিত করতে পারে না। সাধারণতঃ গবেষণাগারে এইসব কেন্দ্রক বিক্রিয়া অনুষ্ঠানের জন্য ত্বরণযন্ত্রের (Accelerator) সাহায্যে ত্বরিত ডয়টেরনগুচ্ছ ব্যবহার করা হয়। যেহেতু ডয়টেরন, ট্রাইটন প্রভৃতি হচ্ছে নিম্ন কেন্দ্রকীয় আধান সম্পন্ন কণিকা, এদের মধ্যেকার কুলম্ব বিকর্ষণী বল কাটাবার জন্য প্রয়োজনীয় শক্তি অপেক্ষাকৃত কম হয়। উদাহরণ-স্বরূপ দুটি ডয়টেরনের মধ্যে কেন্দ্রক বিক্রিয়া সংঘটিত হতে হলে সেগুলির পরস্পরের থেকে $3\times10^{-13}$ সেমি অথবা আরও কম দূরত্বে আসা প্রয়োজন। এই অবস্থায় এদের কুলম্বীয় স্থিতিশক্তি হয়

$$V=\frac{e^2}{R}=\frac{(4{\cdot}8\times10^{-10})^2}{3\times10^{-13}\times1{\cdot}6\times10^{-6}}=0{\cdot}48 \text{ মি-ই-ভো}$$

সুতরাং ডয়টেরনগুলির প্রাথমিক শক্তি উপরোক্ত মাত্রা সম্পন্ন হলেই তাদের মধ্যে সংযোজন বিক্রিয়া ঘটতে পারে। আধুনিক কোয়ানটাম বলবিদ্যা তত্ত্ব অনুযায়ী অবশ্য অনেক কম শক্তি সম্পন্ন ডয়টেরনও সুড়ংগ প্রক্রিয়ার দ্বারা পরস্পরের সান্নিধ্যে উপস্থিত হয়ে বিক্রিয়া অনুষ্ঠিত করতে পারে (17·13 অনুচ্ছেদ দ্রষ্টব্য)। বস্তুতঃ কয়েক সহস্র ইলেকট্রন-ভোল্ট ( কি-ই-ভো ) শক্তি সম্পন্ন কণিকার দ্বারাই এই সব বিক্রিয়া অনুষ্ঠিত করা সম্ভব। অবশ্য উচ্চতর শক্তি সম্পন্ন কণিকা ব্যবহার করলে বিক্রিয়া সংঘটনের সম্ভাব্যতা বেশী হয়, অর্থাৎ বিক্রিয়া অনুষ্ঠিত করা অপেক্ষাকৃত সহজ হয়।

ত্বরণযন্ত্র ব্যবহার না করে অন্য যে উপায়ে প্রোটন, ডয়টেরন প্রভৃতি কণিকাসমূহকে শক্তিশালী করা সম্ভব তা হচ্ছে হাইড্রোজেন, ডয়টেরিয়াম প্রভৃতি গ্যাসকে খুব উচ্চ উষ্ণতা পর্যন্ত ( কয়েক মিলিয়ন ডিগ্রী পর্যন্ত ) উত্তপ্ত

করে তোলা। গতীয় তত্ত্ব (Kinetic Theory) থেকে জানা যায় কোন গ্যাসকে যত উত্তপ্ত করা যায়, তার অণুগুলির গড় তাপীয় বেগ তত উচ্চ হয়। $T^0$ কেল্ উষ্ণতা সম্পন্ন গ্যাসের অণুগুলির গড় তাপীয় শক্তি হচ্ছে

$$E = \frac{3}{2}kT = 1{\cdot}3 \times 10^{-4} T \text{ ই-ভো}$$

এখানে $k = 1{\cdot}38 \times 10^{-16}$ আর্গ/ডিগ্রী C হচ্ছে বোলৎস্মান ধ্রুবক। স্পষ্টতঃ $T$ যদি $10^7$ ডিগ্রী কেল্‌ভিন হয়, তাহলে গড় তাপীয় শক্তির মান কিলো-ইলেকট্রন-ভোল্ট মাত্রা সম্পন্ন হয়।

কোন বাস্তব গ্যাসকে এইরূপ উচ্চ উষ্ণতায় উত্তপ্ত করলে, গ্যাসের অভ্যন্তরে নানারূপ পরিবর্তন সংঘটিত হবে। কয়েক সহস্র ডিগ্রী উষ্ণতায় বেশীর ভাগ গ্যাসের অণুগুলি বিশ্লিষ্ট হয়ে যায় এবং অণু গঠনকারী পরমাণুগুলি মুক্ত অবস্থায় যদৃচ্ছ বিচরণ করতে থাকে। উষ্ণতা যদি আরও বৃদ্ধি করে $10^4$ ডিগ্রী C বা ততোধিক করা হয়, তাহলে কক্ষপথে বিচরণশীল ইলেকট্রনগুলি পরমাণু দেহ থেকে বিচ্ছিন্ন হতে আরম্ভ করে। উষ্ণতা যথেষ্ট উচ্চ হলে পরমাণুগুলি তাদের সব ইলেকট্রন হারায় এবং গ্যাসের মধ্যে তখন ধনাত্মক আধানবাহী কেন্দ্রকগুলি এবং পরমাণু দেহ থেকে বিচ্ছিন্ন ঋণাত্মক ইলেকট্রনগুলি স্বতন্ত্রভাবে যদৃচ্ছ বিচরণ করে। গ্যাসের এই অবস্থাকে বলা হয় প্লাজ্‌মা (Plasma)। প্লাজ্‌মার উষ্ণতা যত বৃদ্ধি পায়, কেন্দ্রক এবং ইলেকট্রনগুলির গড় তাপীয় শক্তি তত উচ্চ হয়। অবশেষে উষ্ণতা $10^7$ (এক কোটি) ডিগ্রী C অথবা আরও উচ্চ হলে এই গড় তাপীয় শক্তি সহস্র ইলেকট্রন ভোল্ট বা ততোধিক হয়। বস্তুতঃ ম্যাক্‌সওয়েলীয় শক্তি বণ্টন সূত্র (Maxwellian Energy Distribution Law) অনুযায়ী এইরূপ উচ্চ উষ্ণতায় প্লাজ্‌মার মধ্যে বর্তমান কিছু সংখ্যক কেন্দ্রকের শক্তি গড় তাপীয় শক্তি অপেক্ষা যথেষ্ট উচ্চতর হয়। এই সব কেন্দ্রকের পক্ষে কুলম্ব বিকর্ষণী বল উপেক্ষা করে পরস্পরের সংগে বিক্রিয়া করার একটা সীমিত সম্ভাব্যতা থাকে। উচ্চ তাপের প্রভাবে অনুষ্ঠিত এইরূপ কেন্দ্রক বিক্রিয়াকে বলা হয় 'তাপীয় কেন্দ্রক বিক্রিয়া' (Thermo Nuclear Reaction)।

প্রশ্ন উঠতে পারে যে এইরূপ অত্যুচ্চ উষ্ণতা উৎপাদন করা যায় কী উপায়ে? বিভিন্ন নক্ষত্রের অভ্যন্তরভাগের উষ্ণতা $10^7$ ডিগ্রী অপেক্ষা উচ্চতর হয়। সূর্যের আভ্যন্তরিক উষ্ণতা প্রায় $2 \times 10^7$ বা দুই কোটি ডিগ্রী সেণ্টিগ্রেড হয়। এইরূপ উষ্ণতায় এইসব নক্ষত্রের অভ্যন্তরে উচ্চ ঘনত্ব সম্পন্ন প্লাজ্‌মার মধ্যে বর্তমান বিভিন্ন হালকা কেন্দ্রকসমূহের মধ্যে তাপীয়

কেন্দ্রক বিক্রিয়া সংঘটিত হতে থাকে। এর ফলে প্রচণ্ড শক্তি উদ্ভূত হয়। কোটি কোটি বৎসর ধরে নক্ষত্ররাজির অভ্যন্তরের অত্যুচ্চ উষ্ণতা অপরিবর্তিত থাকার জন্য দায়ী হচ্ছে এই শক্তি। নক্ষত্র সৃষ্টির প্রাথমিক যুগে মহাকর্ষের প্রভাবে যখন নক্ষত্রগুলির আয়তন কমতে থাকে, তখন এদের উষ্ণতা বৃদ্ধি পেতে থাকে। উষ্ণতা যখন $10^7$ ডিগ্রী বা ততোধিক হয়, তখন তাপীয় কেন্দ্রক বিক্রিয়া সংঘটিত হতে শুরু হয়। যখন নক্ষত্রের উপরিপৃষ্ঠ থেকে শক্তি বিকিরণের হার তাপীয় কেন্দ্রক বিক্রিয়া জনিত শক্তি উৎপাদন হারের সমান হয়, তখন আর নক্ষত্রের উষ্ণতার পরিবর্তন হয় না।

১৯৩৯ সালে বেথে (Hans Bethe) নামক বিজ্ঞানী বিভিন্ন প্রকার কেন্দ্রক বিক্রিয়া বিবেচনা করে কী ধরনের বিক্রিয়া সংঘটিত হওয়ায় ফলে সূর্যের অভ্যন্তরে শক্তি উদ্ভূত হতে পারে, সে সম্বন্ধে একটি প্রস্তাবনা দেন। যেহেতু সূর্যের অভ্যন্তরে বর্তমান উপাদানসমূহের মধ্যে হাইড্রোজেনের প্রাধান্য সমধিক ( প্রায় 35%), সুতরাং বেথে অনুমান করেন যে অত্যুচ্চ উষ্ণতায় এই সব হাইড্রোজেন পরমাণুর কেন্দ্রকগুলি উচ্চ বেগ অর্জন করে বিভিন্ন প্রকার কেন্দ্রক বিক্রিয়া সংঘটিত করে। বেথের মতানুসারে এদের মধ্যে ধাপে ধাপে সংঘটিত কয়েকটি বিশেষ ধরনের বিক্রিয়ার ফলে চারটি প্রোটন সংযোজিত হয় এবং একটি হিলিয়াম কেন্দ্রক সৃষ্ট হয় ও কিছুটা শক্তি উদ্ভূত হয়। এই বিক্রিয়াসমূহ নিম্নে প্রদত্ত সমীকরণগুলি দ্বারা নির্দেশ করা যায়ঃ

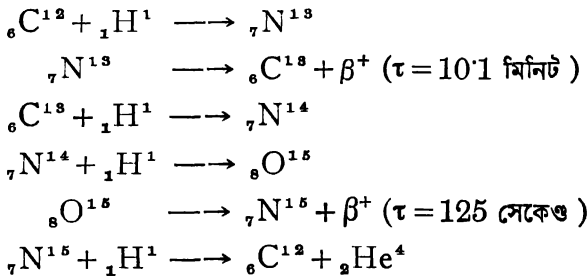
$${}_6C^{12} + {}_1H^1 \longrightarrow {}_7N^{13}$$

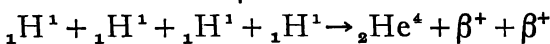
$${}_7N^{13} \longrightarrow {}_6C^{13} + \beta^+ \ (\tau = 10{\cdot}1 \text{ মিনিট})$$

$${}_6C^{13} + {}_1H^1 \longrightarrow {}_7N^{14}$$

$${}_7N^{14} + {}_1H^1 \longrightarrow {}_8O^{15}$$

$${}_8O^{15} \longrightarrow {}_7N^{15} + \beta^+ \ (\tau = 125 \text{ সেকেণ্ড})$$

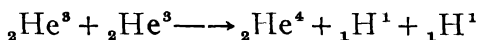
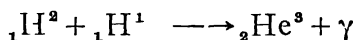
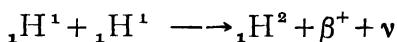
$${}_7N^{15} + {}_1H^1 \longrightarrow {}_6C^{12} + {}_2He^4$$

প্রথম ধাপে একটি $C^{12}$ কেন্দ্রক একটি প্রোটন শোষণ করে। আর সব শেষের ধাপে একটি নূতন $C^{12}$ কেন্দ্রক উৎপন্ন হয়। সুতরাং উপরে আলোচিত বিভিন্ন বিক্রিয়াগুলি সংঘটিত হওয়ার ফলে $C^{12}$ আইসোটোপের মোট কোন অবক্ষয় ঘটে না। অর্থাৎ $C^{12}$ যেন এক্ষেত্রে অনুঘটকের (Catalyst) কাজ করে। উপরের সমীকরণগুলিকে যোগ করলে পাওয়া যায়ঃ

$${}_1H^1 + {}_1H^1 + {}_1H^1 + {}_1H^1 \rightarrow {}_2He^4 + \beta^+ + \beta^+$$

অর্থাৎ সব বিক্রিয়াগুলি অনুষ্ঠিত হওয়ার মোট ফলে হচ্ছে যে চারটি প্রোটন বিনষ্ট হয় এবং একটি $He^4$ কেন্দ্রক ও দুটি পজিট্রন উৎপন্ন হয়। বিভিন্ন ধাপে নিঃসৃত বিক্রিয়া শক্তি এবং পজিট্রন দুটির শক্তি যোগ করলে মোট উদ্ভূত শক্তির মান পাওয়া যায় প্রায় 26·7 মি-ই-ভো। উপরে প্রদত্ত বিক্রিয়াগুলিকে বলা হয় 'কার্বন-নাইট্রোজেন চক্র' (Carbon-Nitrogen Cycle)।

বর্তমানে প্রচলিত মতানুসারে কার্বন-নাইট্রোজেন চক্র অনুষ্ঠিত হয় প্রধানতঃ সূর্য অপেক্ষা বহুগুণে বেশী উজ্জ্বল প্রধান ক্রমের (Main Sequence) নক্ষত্ররাজির মধ্যে। কারণ এক্ষেত্রে শক্তি উৎপাদনের হার খুব বেশী হয়। সূর্যের মধ্যে শক্তি উৎপাদন হয় খুব সম্ভবতঃ অন্য ধরনের কয়েকটি বিক্রিয়ার ফলে। এই বিক্রিয়াগুলিকে বলা হয় 'প্রোটন-প্রোটন চক্র' (Proton-Proton Cycle)। এক্ষেত্রেও চারটি প্রোটনের সংযোজন হয় ও একটি $He^4$ কেন্দ্রক উৎপন্ন হয়। বিভিন্ন ধাপের বিক্রিয়াগুলি নিম্নলিখিত সমীকরণগুলি দ্বারা নির্দেশিত করা যায়ঃ

$$_1H^1 + {}_1H^1 \longrightarrow {}_1H^2 + \beta^+ + \nu$$

$$_1H^2 + {}_1H^1 \longrightarrow {}_2He^3 + \gamma$$

$$_2He^3 + {}_2He^3 \longrightarrow {}_2He^4 + {}_1H^1 + {}_1H^1$$

এক্ষেত্রে বিক্রিয়া অনুষ্ঠানের হার অপেক্ষাকৃত অনেক মন্থর হয়।

এখানে উল্লেখযোগ্য যে নক্ষত্ররাজির অভ্যন্তরে উপরে প্রদত্ত কার্বন-নাইট্রোজেন চক্র বা প্রোটন-প্রোটন চক্র একবার সম্পূর্ণ হবার জন্য বহু লক্ষ বৎসর সময় অতিবাহিত হওয়া প্রয়োজন হয়। তা সত্ত্বেও বিশাল আয়তন সম্পন্ন নক্ষত্রসমূহের মধ্যে প্রোটন সংখ্যার প্রাচুর্যের জন্য যে বিপুল পরিমাণ শক্তি উৎপন্ন হতে থাকে তার ফলে নক্ষত্ররাজি শত শত কোটি বৎসর ধরে দীপ্তিমান থাকে।

প্রাকৃতিক জগতে তাপীয় কেন্দ্রক বিক্রিয়ার ফলে শক্তি উৎপাদনের উপরে প্রদত্ত দৃষ্টান্ত থেকে স্বভাবতঃই মনে হতে পারে যে আমাদের এই পৃথিবীতে উপরোক্ত পদ্ধতিতে শক্তি উৎপাদন করা সম্ভব কী না। আধুনিক সভ্যতার ক্রমবিকাশ এবং প্রগতির সর্বাপেক্ষা বড় সহায়ক হচ্ছে প্রাকৃতিক শক্তিকে মানব কল্যাণের কাজে প্রয়োগ করার কৌশল আয়ত্ত করা। যে সব বিভিন্ন প্রাকৃতিক উৎস থেকে আমরা শক্তি আহরণ করি তার মধ্যে আছে

কাঠ, কয়লা, জ্বালানী তৈল প্রভৃতি রাসায়নিক শক্তির উৎস, জল-বিদ্যুৎ (Hydro Electric) শক্তির উৎস, ইউরেনিয়াম প্রভৃতি কেন্দ্রকীয় শক্তির উৎস। বর্তমানে পৃথিবীর বিভিন্ন দেশে যে হারে শক্তি ব্যবহৃত হয় তাতে এই সব শক্তির ভাণ্ডার কয়েক শত বৎসরের মধ্যে শেষ হয়ে যাবার সম্ভাবনা। অপরপক্ষে তাপীয় কেন্দ্রক বিক্রিয়ার দ্বারা শক্তি উৎপাদনের প্রধান উৎস হচ্ছে হাইড্রোজেনের ভারী আইসোটোপ ($H^2$), পৃথিবীর মহাসাগরগুলির মধ্যে যার প্রাচুর্যের কোন অভাব নাই। কারণ প্রাকৃতিক হাইড্রোজেনে প্রতি সাত সহস্র সাধারণ হাইড্রোজেন পরমাণুর সংগে একটি করে ভারী হাইড্রোজেন পরমাণু মিশ্রিত থাকে। সুতরাং তাপীয় কেন্দ্রকীয় পদ্ধতিতে (Thermo Nuclear Process) ডয়টেরন সংযোজনের দ্বারা প্রাপ্ত শক্তির ব্যবহারিক প্রয়োগ করতে পারলে পৃথিবীতে শক্তি উৎপাদনের জন্য প্রয়োজনীয় উৎসের সমস্যার চিরকালের জন্য সমাধান হয়ে যাবে।

তাপীয় কেন্দ্রকীয় পদ্ধতিতে শক্তি উৎপাদনের জন্য সর্বাগ্রে প্রয়োজন অত্যুচ্চ উষ্ণতা ( প্রায় দুই কোটি ডিগ্রী ) সৃষ্টি করা। বিস্ফোরিত পরমাণবিক বোমার অভ্যন্তরে এইরূপ অত্যুচ্চ উষ্ণতার সৃষ্টি হয়, একথা জানা আছে। যদি একটি পরমাণবিক বোমাকে আবেষ্টন করে কেন্দ্রকীয় সংযোজন (Nuclear Fusion) সৃষ্টিকারী কোন পদার্থ, যথা হাইড্রোজেন, ডয়টেরিয়াম ইত্যাদি স্থাপিত থাকে, তাহলে পরমাণবিক বোমা বিস্ফোরণের ফলে উৎপন্ন অত্যুচ্চ উষ্ণতায় এই সব পদার্থের মধ্যে সংযোজন বিক্রিয়া (Fusion Reaction) অনুষ্ঠিত হতে আরম্ভ হবে। এর ফলে উদ্ভূত শক্তির প্রভাবে বিস্ফোরকের উচ্চ উষ্ণতা অপরিবর্তিত থাকবে এবং অতি অল্প সময়ের মধ্যে সমগ্র পরিমাণ পদার্থ সংযোজন বিক্রিয়ার দ্বারা ভস্মীভূত হয়ে যাবে। ফলে যে প্রচণ্ড বিস্ফোরণ ঘটবে তা পরমাণবিক বোমার বিস্ফোরণ ক্ষমতাকে ম্লান করে দেবে। এই জাতীয় বোমাকে হাইড্রোজেন-বোমা (Hydrogen Bomb) আখ্যা দেওয়া হয়। আমেরিকা, রাশিয়া, ইংল্যাণ্ড, ফ্রান্স এবং চীন এই কয়টি দেশে ইতিমধ্যে হাইড্রোজেন বোমা তৈয়ারীর কৌশল আয়ত্ত করা হয়েছে। দশ লক্ষ টন ( মেগাটন ) বা আরও বেশী পরিমাণ টি. এন্. টি. (T. N. T.) বিস্ফোরকের বিস্ফোরণ ক্ষমতা সম্পন্ন হাইড্রোজেন বোমা নির্মিত হয়েছে। হাইড্রোজেন বোমা বিস্ফোরণের ফলে নিঃসৃত শক্তির পরিমাণ প্রায় সীমাহীন বললেও চলে। যত বেশী পরিমাণ সংযোজন বিক্রিয়া সৃষ্টিকারী পদার্থ ব্যবহার করা যায় তত বেশী শক্তিশালী বোমা নির্মাণ করা সম্ভব।

পরমাণবিক বোমার মধ্যে ব্যবহৃত ইউরেনিয়াম বা প্লুটোনিয়ামের পরিমাণের একটা উচ্চসীমা আছে। সেজন্য এই জাতীয় বোমার বিস্ফোরণ ক্ষমতারও একটা উচ্চসীমা থাকে। কিন্তু হাইড্রোজেন বোমার কেন্দ্রস্থ পরমাণবিক বোমাকে আচ্ছাদিত করে ডয়টেরিয়াম সম্বলিত যে পদার্থের আচ্ছাদন থাকে তার পরিমাণ ইচ্ছামত বাড়িয়ে এইরূপ বোমার বিস্ফোরণ ক্ষমতা যদৃচ্ছ বাড়ান যায়। তাছাড়া ডয়টেরন সম্বলিত আচ্ছাদনকে যদি $U^{238}$ এর আরও একটি আচ্ছাদন দ্বারা বেষ্টন করা যায়, তাহলে হাইড্রোজেন বোমা বিস্ফোরণের সময়ে উৎপন্ন বিপুল সংখ্যক নিউট্রনের নির্গমন কালে $U^{238}$ এর আচ্ছাদনের মধ্যে কেন্দ্রক বিভাজনের ফলে আরও বেশী পরিমাণ শক্তি উৎপন্ন হতে পারে। এইরূপ 'বিভাজন-সংযোজন-বিভাজন' (Fission-Fusion-Fission) পদ্ধতি দ্বারা সর্বোচ্চ শক্তিশালী বোমা নির্মাণ করা হয়।

হাইড্রোজেন বোমা বিস্ফোরণের ফলে নিঃসৃত শক্তি নিয়ন্ত্রণ করা সম্ভব নয়। সুতরাং এই শক্তির ব্যবহারিক প্রয়োগ সম্ভব নয়। ব্যবহারিক প্রয়োগ সম্ভব করতে হলে শক্তি উৎপাদন প্রক্রিয়াকে কোন আধারের মধ্যে সীমাবদ্ধ রেখে উৎপাদনের হারকে নিয়ন্ত্রিত করতে হবে। আপাতদৃষ্টিতে এই কাজ প্রায় অসম্ভব বলে মনে হতে পারে, কারণ পৃথিবীতে এমন কোন পদার্থ নাই যার দ্বারা নির্মিত আধারের মধ্যে কোন গ্যাসকে কয়েক কোটি ডিগ্রী উষ্ণতা পর্যন্ত উত্তপ্ত করা যেতে পারে।

সাম্প্রতিক কালে বিজ্ঞানীগণ এই সমস্যা সমাধানের জন্য নানারূপ উপায় আবিষ্কারের চেষ্টা করেছেন। আমরা জানি যে কোন পদার্থের উষ্ণতা এবং এর অভ্যন্তরের কণিকাসমূহের গড় শক্তির মধ্যে একটা নির্দিষ্ট গাণিতিক সম্পর্ক আছে $(E=\frac{3}{2}kT)$। কেন্দ্রকীয় সংযোজন উৎপন্ন করার জন্য প্রয়োজন কয়েক সহস্র ইলেকট্রন-ভোল্ট শক্তি সম্পন্ন হাল্কা পরমাণুর কেন্দ্রক। গ্যাসের প্লাজ্‌মার মধ্যে অত্যুচ্চ তড়িৎ প্রবাহ পাঠালে অনেক সময় প্লাজ্‌মা মধ্যস্থ কণিকাগুলি এইরূপ উচ্চশক্তি অর্জন করে। তড়িৎ প্রবাহ সংশ্লিষ্ট চৌম্বক ক্ষেত্রের প্রভাবে ত্বরিত কণিকাগুলিকে কোন আবদ্ধ নলের অক্ষীয় অঞ্চলে সীমাবদ্ধ রাখা সম্ভব। এই ব্যবস্থাকে বলা হয় 'চুম্বকীয়-বোতল' (Magnetic Bottle)। বিগত কয়েক বৎসরে এইরূপ চুম্বকীয়-বোতলের মধ্যে খুব অল্প সময়ের জন্য অত্যুচ্চ উষ্ণতা এবং অত্যুচ্চ চাপ উৎপন্ন করা সম্ভব হয়েছে। যদি যথেষ্ট সময়ের জন্য এইরূপ উষ্ণতা উৎপন্ন করা যায়, তাহলে উচ্চশক্তি কেন্দ্রকগুলির সংযোজন অনুষ্ঠিত হওয়ার ফলে যে শক্তি

নিঃসৃত হবে তার জন্য এইরূপ বিক্রিয়া স্বতঃস্ফূর্ত ভাবে চলতে থাকবে, এবং নিয়ন্ত্রিত হারে শক্তি উৎপাদন সম্ভব হতে পারে।

বর্তমানে পৃথিবীর বিভিন্ন দেশে এ সম্বন্ধে সবিশেষ প্রচেষ্টা চালান হচ্ছে। এর মধ্যে আমেরিকায় উদ্ভাবিত ষ্টেলারেটর (Stellarator) এবং রাশিয়ায় উদ্ভাবিত টোকোমাক (Tokomak) শ্রেণীর যন্ত্রের সাহায্যে সংযোজন বিক্রিয়ালব্ধ শক্তির ব্যবহারিক প্রয়োগের প্রচেষ্টা বিশেষ উল্লেখযোগ্য। § সম্প্রতি রাশিয়ায় টোকোমাক-III যন্ত্রের সাহায্যে 0·02 সেকেণ্ড সময়ের জন্য পাঁচ মিলিয়ন $(5\times10^6)$ ডিগ্রী C উষ্ণতায় প্রতি একক আয়তনে $10^{14}$ আয়ন সম্পন্ন প্লাজ্‌মা উৎপন্ন করা সম্ভব হয়েছে। কার্যোপযোগী শক্তি-উৎপাদক নির্মাণের জন্য উষ্ণতা আরও অন্ততঃ কুড়িগুণ বৃদ্ধি করা প্রয়োজন; তাছাড়া আয়নের সংখ্যা-ঘনত্ব এবং সীমাবদ্ধ রাখার সময়ের পরিমাণও যথেষ্ট বৃদ্ধি করতে হবে। সব দিক বিবেচনা করলে মনে হয় বর্তমান শতাব্দী শেষ হবার আগে বিজ্ঞানীগণের এই সব প্রচেষ্টা ফলবতী হবে না।

---

§ বিঃ দ্রঃ। বর্তমানে বিভিন্ন দেশে লেজার রশ্মিগুচ্ছের (Laser Beam) সাহায্যে সংযোজন শক্তির ব্যবহারিক উৎপাদনের জন্য নানারূপ গবেষণা চালান হচ্ছে।

পরিচ্ছেদ 20

# মহাজাগতিক রশ্মি ও মৌলিক কণিকারাজি

## 20·1 : মহাজাগতিক রশ্মির আবিষ্কার

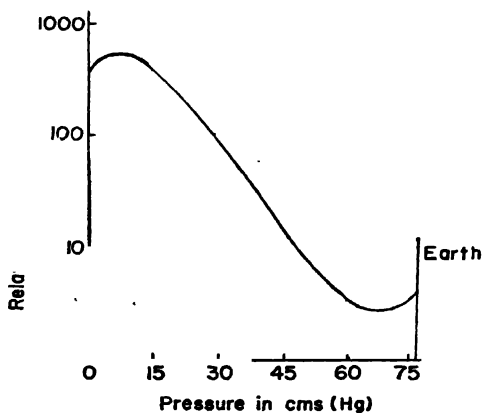
উনবিংশ শতাব্দীর শেষভাগে তেজস্ক্রিয়তা আবিষ্কৃত হয়। এর অল্প কিছুদিনের মধ্যে মহাজাগতিক রশ্মি আবিষ্কৃত হয়। এই আবিষ্কার পরবর্তী যুগে পরমাণু কেন্দ্রকের গঠন সম্বন্ধে বিজ্ঞানীমহলের ধারণাকে সুস্পষ্ট করে তোলার পক্ষে বিশেষ সহায়ক হয়। তাছাড়া বর্তমানে সুপরিজ্ঞাত নানাবিধ মৌলিক কণিকাসমূহের (Elementary Particles) আবিষ্কারও মহাজাগতিক রশ্মি সংক্রান্ত গবেষণার সংগে প্রত্যক্ষ বা পরোক্ষ ভাবে জড়িত।

১৯০০ সালে জার্মান বিজ্ঞানীদ্বয় এল্‌ষ্টার ও গাইটেল (Elster and Geitel) এবং বৃটিশ বিজ্ঞানী উইলসন (C.T.R. Wilson) স্বতন্ত্রভাবে লক্ষ্য করেন যে খুব যত্ন সহকারে অন্তরিত (Insulated) তড়িৎবীক্ষণ যন্ত্র (Electroscope) যদি তড়িতাহিত অবস্থায় ফেলে রাখা যায় তাহলে এর থেকে খুব মন্থর হারে আধানের ক্ষরণ (Leakage) হতে থাকে। তড়িৎবীক্ষণ যন্ত্রটিকে ধাতব প্লেট দিয়ে বেষ্টিত করে রাখলে আধান ক্ষরণের হার কমে যেতে দেখা যায়। এর থেকে অনুমান করা যায় যে তড়িৎবীক্ষণের উপরোক্ত আধান ক্ষরণ হয় প্রধানতঃ কোন বহিরাগত বিকিরণের প্রভাবে। এই বিকিরণ তড়িৎবীক্ষণের অভ্যন্তরস্থ বাতাসকে আয়নিত করে। এদের মধ্যে বিপরীত আধানবাহী আয়নসমূহ যন্ত্রের আধানকে বিনষ্ট করে।

প্রাথমিক যুগে অনুমিত হয় যে এই অজ্ঞাত বিকিরণ সম্ভবতঃ ভূপৃষ্ঠের উপরে বা বায়ুমণ্ডলে খুব অল্প পরিমাণে বর্তমান তেজস্ক্রিয় পদার্থ থেকে উদ্ভূত হয়। এই অনুমানের সত্যতা যাচাই করার জন্য গোকেল (Gockel), হেস (Hess) ও কোলহোয়্‌রষ্টার (Kolhörster) প্রমুখ বিজ্ঞানীগণ বেলুনের সাহায্যে পৃথিবীপৃষ্ঠ থেকে বিভিন্ন উচ্চতায় আয়নন কক্ষ (Ionization Chamber) প্রেরণ করে এই বিকিরণের তীব্রতা পরিবর্তন পরিমাপ করেন। তাঁদের পরিমাপ থেকে দেখা যায় যে বিকিরণের তীব্রতা উচ্চতা বৃদ্ধির সংগে প্রথমে হ্রাস পেলেও পরে 2000 মিটার অপেক্ষা বেশী উচ্চতায় দ্রুত বৃদ্ধি পেতে থাকে। 9000 মিটার উচ্চতা পর্যন্ত এইরূপ পরিমাপ করে দেখা যায় যে বিকিরণের তীব্রতা নিরবচ্ছিন্ন ভাবে বৃদ্ধি পায়।

১৯১১ সালে হেস (Hess) উপরোক্ত তথ্যগুলিকে নিম্নলিখিত উপায়ে ব্যাখ্যা করেন। তাঁর মতে এই অজ্ঞাত বিকিরণের অংশ মাত্র ভূপৃষ্ঠে বর্তমান তেজস্ক্রিয় পদার্থসমূহ থেকে উদ্ভূত হয়। বাকী অংশ বহির্জগৎ থেকে এসে পৃথিবীর উপরে আপতিত হয়। উচ্চতার সংগে তীব্রতার প্রাথমিক হ্রাসের জন্য দায়ী হচ্ছে ভূপৃষ্ঠে বর্তমান তেজস্ক্রিয় পদার্থ নিঃসৃত বিকিরণসমূহ। পরে বেশী উচ্চতায় তীব্রতা বৃদ্ধির জন্য দায়ী হচ্ছে বহিরাগত বিকিরণ। এই শেষোক্ত বিকিরণের ভেদ্যতা স্পষ্টতঃ খুবই বেশী। তেজস্ক্রিয় পদার্থ নিঃসৃত $\gamma$-রশ্মি অপেক্ষাও এর ভেদ্যতা (Penetrability) অনেক বেশী হয়। পৃথিবীর বায়ুমণ্ডলে এর কিছু অংশ শোষিত হলেও সমুদ্রপৃষ্ঠ পর্যন্ত এই বিকিরণের নিদর্শন পাওয়া যায়। হেস এবং অন্যান্য বিজ্ঞানীগণ আরও লক্ষ্য করেন যে দিন এবং রাত্রির মধ্যে এই বিকিরণের তীব্রতার কোন পরিবর্তন ঘটে না। এই নব আবিষ্কৃত বিকিরণের নাম দেওয়া হয় 'মহাজাগতিক রশ্মি' (Cosmic Rays)।

### 20·2 : মহাজাগতিক রশ্মির শোষণ

মহাজাগতিক রশ্মি আবিষ্কারের অব্যবহিত পরেই বিজ্ঞানীগণ এর

চিত্র 20·1

বায়ুমণ্ডলে মহাজাগতিক রশ্মি শোষণের লেখচিত্র।

অত্যধিক ভেদ্যতা লক্ষ্য করেন। এই বিষয়ে পরীক্ষা করার জন্য বহু সংখ্যক বিজ্ঞানী পৃথিবীর বায়ুমণ্ডলে বিভিন্ন উচ্চতায় এই রশ্মির শোষণ পরিমাপ

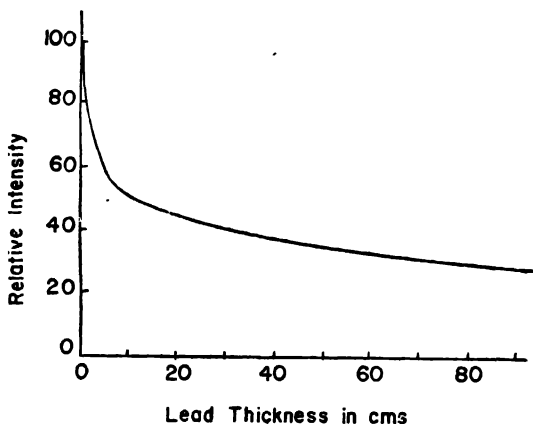
করেন। এই সব পরীক্ষার ফল (20·1) চিত্রে প্রদর্শিত হয়েছে। সমুদ্রপৃষ্ঠ থেকে যত ঊর্ধ্বে যাওয়া যায় বায়ুমণ্ডলীয় চাপ তত কমে। (20·1) চিত্রে বায়ুমণ্ডলীয় চাপের সংগে মহাজাগতিক রশ্মি কর্তৃক পরীক্ষাধীন আয়নন কক্ষের (Ionization Chamber) মধ্যে প্রতি একক আয়তনে আয়ন সৃষ্টির হার পরিবর্তনের লেখচিত্র প্রদর্শিত হয়েছে। এই শেষোক্ত রাশি আয়নন কক্ষের উপরে আপতিত মহাজাগতিক রশ্মির তীব্রতা বৃদ্ধির সংগে বৃদ্ধি পায়। সুতরাং (20·1) চিত্রে প্রকৃতপক্ষে উচ্চতা বৃদ্ধির সংগে মহাজাগতিক রশ্মির তীব্রতা পরিবর্তনের লেখচিত্র প্রদর্শিত হয়েছে।

সমুদ্রপৃষ্ঠ থেকে বহু ঊর্ধ্বে বায়ুমণ্ডলীয় চাপ প্রায় শূন্য হয়। 30 কিলো-মিটার উচ্চতায় বায়ুমণ্ডলীয় চাপ সমুদ্রপৃষ্ঠের চাপের মাত্র শতকরা এক ভাগ হয়। (20·1) চিত্র থেকে দেখা যায় যে, এইসব ঊর্ধ্বে অবস্থিত বায়ুমণ্ডলীয় স্তর থেকে যত নীচের দিকে আসা যায়, অর্থাৎ বায়ুমণ্ডলীয় চাপ যত বৃদ্ধি পায়, মহাজাগতিক রশ্মির তীব্রতা তত হ্রাস পেতে থাকে। অবশেষে সমুদ্র-পৃষ্ঠ থেকে প্রায় 2 কিলোমিটার উচ্চতায়, যেখানে চাপ প্রায় 70 সেমি (Hg) হয়, তীব্রতা ন্যূনতম হয়। এর পর সমুদ্রপৃষ্ঠ পর্যন্ত নেমে আসতে তীব্রতা আবার অল্প বৃদ্ধি পায়। পৃথিবীর বাইরে থেকে আগত মহাজাগতিক রশ্মি বায়ুমণ্ডলের শীর্ষদেশ থেকে যত নীচের দিকে নামতে থাকে, ততই একে গভীরতর বায়ুস্তর ভেদ করে যেতে হয়। ফলে এই রশ্মি ক্রমশঃ বেশী পরিমাণে শোষিত হতে থাকে এবং এর তীব্রতা হ্রাস পেতে থাকে। সমুদ্রপৃষ্ঠের কাছাকাছি এসে তীব্রতার পুনরায় বৃদ্ধির কারণ হচ্ছে ভূত্বকে বর্তমান তেজস্ক্রিয় পদার্থ নিঃসৃত বিকিরণের প্রভাব।

পৃথিবীর বায়ুমণ্ডল পার হয়ে আসতে মহাজাগতিক রশ্মিকে যে পরিমাণ বায়ুস্তর ভেদ করে আসতে হয় তা প্রায় দশ মিটার জলস্তরের বা প্রায় এক মিটার সীসার স্তরের সমতুল্য। অত্যুচ্চ শক্তি সম্পন্ন $\gamma$-রশ্মিও এর চেয়ে অনেক কম বেধ সম্পন্ন পদার্থের মধ্যে সম্পূর্ণ শোষিত হয়ে যায়। এর থেকে মহাজাগতিক রশ্মির উচ্চ ভেদ্যতা সম্বন্ধে কিছুটা আভাস পাওয়া যায়।

মহাজাগতিক রশ্মির অত্যধিক ভেদ্যতা সম্বন্ধে পরীক্ষা করার জন্য রেগনার (Regener), ক্লে (Clay) প্রভৃতি ইউরোপীয় বিজ্ঞানীগণ এবং মিলিকান (Millikan), ক্যামেরন (Cameron) প্রভৃতি আমেরিকান বিজ্ঞানীগণ গভীর হ্রদের এবং খনির তলদেশে এই রশ্মির তীব্রতা পরিমাপ করেন। জল-অপ্রবেশ্য (Water-tight) আধারের মধ্যে অবস্থিত তড়িৎবীক্ষণ বা আয়নন

কক্ষ গভীর হ্রদের জলের মধ্যে নিমজ্জিত করে স্বতশ্চালিত অভিলেখের (Automatic Rocorder) সাহায্যে বিভিন্ন গভীরতায় তীব্রতা পরিমাপ করার ব্যবস্থা করা হয়। তাছাড়া খনির তলদেশেও এই ধরনের যন্ত্র নিয়ে গিয়ে পরীক্ষা করা হয়। বহু সংখ্যক বিজ্ঞানী কর্তৃক অনুষ্ঠিত এইসব পরীক্ষা থেকে কয়েকশত মিটার গভীর জলস্তরের নীচেও মহাজাগতিক রশ্মির অস্তিত্বের নিদর্শন পাওয়া যায়। উদাহরণস্বরূপ 280 মিটার গভীর জলতলে এই রশ্মির তীব্রতা সমুদ্রপৃষ্ঠে পরিমিত তীব্রতার এক শতাংশ হয়। তুলনামূলক হিসাবে 2·62 মি-ই-ভো ThC″ নিঃসৃত $\gamma$-রশ্মির তীব্রতা 1·5 মিটার জলস্তর ভেদ করার পরে প্রাথমিক তীব্রতার মাত্র 0·5% হয়। অর্থাৎ মহাজাগতিক রশ্মির ভেদ্যতা উপরোক্ত $\gamma$-রশ্মির তুলনায় শতাধিক গুণ বেশী হয়।

পরে সমুদ্রপৃষ্ঠে অবস্থিত বিভিন্ন পরীক্ষাগারে নানাবিধ পদার্থের মধ্যে মহাজাগতিক রশ্মির শোষণ পরিমাপ করা হয়। (20·2) চিত্রে সীসার মধ্যে

চিত্র 20·2

সমুদ্রপৃষ্ঠে সীসার মধ্যে মহাজাগতিক রশ্মি শোষণের লেখচিত্র।

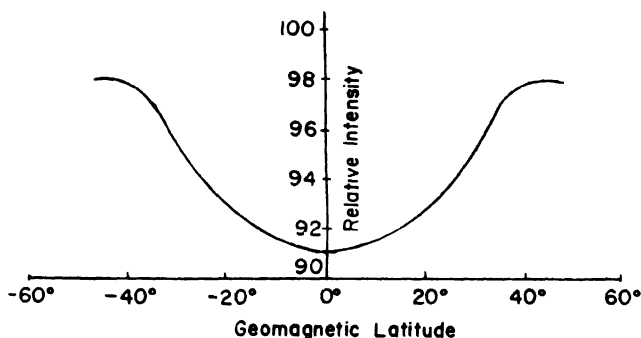
মহাজাগতিক রশ্মির শোষণ কীরূপ হয় তা লেখচিত্রাকারে প্রদর্শিত হয়েছে। এই চিত্র থেকে দেখা যায় যে মহাজাগতিক রশ্মির তীব্রতা প্রথমে অপেক্ষাকৃত দ্রুত হ্রাস পায়; পরে কিন্তু তীব্রতা হ্রাসের হার অনেক মন্থর হয়ে যায়। এই তথ্য থেকে প্রতীয়মান হয় যে মহাজাগতিক রশ্মির মধ্যে দুই প্রকার বিকিরণ বর্তমান। এদের মধ্যে একাংশের ভেদ্যতা অপেক্ষাকৃত কম হয়। দশ

সেণ্টিমিটার অপেক্ষা কম পুরু সীসার দ্বারা এই অংশ প্রায় সম্পূর্ণ শোষিত হয়ে যায়। এই অংশকে 'নরম বিকিরণ বা স্বল্পভেদী বিকিরণ' (Soft Radiation) বলা হয়। অপরাংশের ভেদ্যতা অনেক বেশী হয়। এক মিটার পুরু সীসার দ্বারাও এই অংশ সম্পূর্ণ শোষিত হয় না। এই অংশকে সাধারণতঃ 'কঠিন বিকিরণ' (Hard Radiation) বা 'উচ্চভেদী বিকিরণ' (Penetrating Radiation) বলা হয়। সমুদ্রপৃষ্ঠে মোট তীব্রতার প্রায় কুড়ি শতাংশ হচ্ছে স্বল্পভেদী বিকিরণ। যেহেতু বায়ুমণ্ডলের মোট শোষণ ক্ষমতা প্রায় এক মিটার সীসার শোষণ ক্ষমতার সমান, অতএব উপরোক্ত স্বল্পভেদী বিকিরণ বহির্জগৎ থেকে আসতে পারে না। কারণ সেক্ষেত্রে এই বিকিরণ বায়ুমণ্ডলের উপরিভাগেই সম্পূর্ণ শোষিত হয়ে যেত। সমগ্র বায়ুমণ্ডল ভেদ করে সমুদ্রপৃষ্ঠ পর্যন্ত আসতে পারত না। এর থেকে সিদ্ধান্ত করা যায় যে এই বিকিরণ হচ্ছে একপ্রকার গৌণ (Secondary) বিকিরণ, বহিরাগত মুখ্য (Primary) মহাজাগতিক বিকিরণ নয় ; এর সৃষ্টি হয় পৃথিবীর বায়ুমণ্ডলের মধ্যে। বহুবিধ পরীক্ষার দ্বারা প্রমাণিত হয়েছে যে স্বল্পভেদী বিকিরণের মধ্যে থাকে প্রধানতঃ উচ্চশক্তি ইলেকট্রন, পজিট্রন ও $\gamma$-রশ্মি এবং অপেক্ষাকৃত কম শক্তি সম্পন্ন প্রোটন ও অন্যান্য নূতন ধরনের আহিত কণিকা ( যথা মেসন )। অপরপক্ষে সমুদ্রপৃষ্ঠে প্রাপ্ত উচ্চভেদী বিকিরণ হচ্ছে প্রধানতঃ এক প্রকার উচ্চশক্তি আহিত কণিকা ( $\mu$-মেসন )। এ সম্বন্ধে পরে বিস্তারিত আলোচনা করা হবে।

## 20·3 : অক্ষাংশের সংগে মহাজাগতিক রশ্মির তীব্রতা পরিবর্তন

১৯২৭ সালে ডাচ্ বিজ্ঞানী ক্লে (Clay) ভারত মহাসাগরে বিষুবরেখা অঞ্চলে অবস্থিত ইন্দোনেসিয়া এবং তাঁর স্বদেশ হল্যাণ্ডের মধ্যে জলপথে ভ্রমণকালে বিভিন্ন স্থানে মহাজাগতিক রশ্মির তীব্রতা পরিমাপ করেন। তিনি লক্ষ্য করেন যে বিষুব অঞ্চলে মহাজাগতিক রশ্মির তীব্রতা ইউরোপের উচ্চ অক্ষাংশীয় অঞ্চলের তুলনায় অপেক্ষাকৃত কম হয়। এর থেকে সিদ্ধান্ত করা হয় যে মহাজাগতিক রশ্মির তীব্রতা ভূপৃষ্ঠের অক্ষাংশের সংগে পরিবর্তিত হয়। কিছুদিন পরে ক্লে তাঁর পরীক্ষা পুনরনুষ্ঠিত করেন। পরে ( ১৯৩০-৩৩ সালে ) প্রখ্যাত আমেরিকান বিজ্ঞানী কম্পটন (A. H. Compton) এবং তাঁর সহকর্মীবৃন্দ পৃথিবীর বিভিন্ন অঞ্চলে অবস্থিত ঊনসত্তরটি স্থানে সমুদ্রপৃষ্ঠে মহাজাগতিক রশ্মির তীব্রতা পরিমাপ করেন। তাঁদের এই সমস্ত পরীক্ষা অনুষ্ঠিত হয় $55°$ উত্তর অক্ষাংশ থেকে $45°$ দক্ষিণ অক্ষাংশের মধ্যে অবস্থিত

বিস্তীর্ণ অঞ্চলের মধ্যে। এছাড়া মিলিকান (R. A. Millikan), নেহার (Neher) প্রমুখ বিজ্ঞানীগণ পৃথিবীর বিভিন্ন স্থানে অভিযান চালিয়ে অনুরূপ পরীক্ষা অনুষ্ঠিত করেন। নেহার এবং তাঁর সহকর্মীবৃন্দ বায়ুমণ্ডলের মধ্যে 30,000 মিটার পর্যন্ত বিভিন্ন উচ্চতায় অনুরূপ পরিমাপ করেন। এই সমস্ত পরীক্ষা থেকে অক্ষাংশের সঙ্গে মহাজাগতিক রশ্মির তীব্রতা পরিবর্তন সম্বন্ধে ক্লে যে প্রাথমিক সিদ্ধান্ত করেন তা দৃঢ়ভাবে সমর্থিত হয়।

(20·3) চিত্রে সমুদ্রপৃষ্ঠে অক্ষাংশের সংগে মহাজাগতিক রশ্মির তীব্রতা

চিত্র 20·3

সমুদ্রপৃষ্ঠে ভূচুম্বকীয় অক্ষাংশের সংগে মহাজাগতিক রশ্মির তীব্রতা পরিবর্তনের লেখচিত্র।

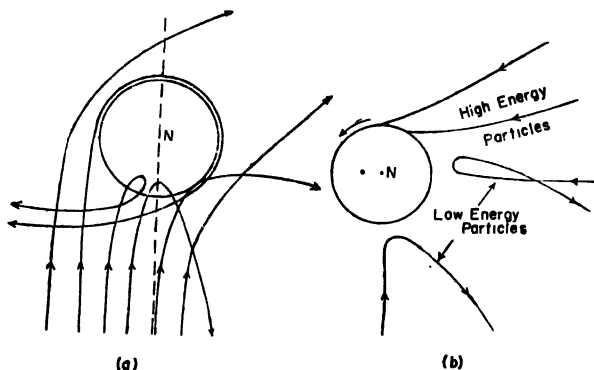
পরিবর্তনের লেখচিত্র প্রদর্শিত হয়েছে। চিত্র থেকে দেখা যায় যে বিষুবরেখা ( 0° অক্ষাংশ ) থেকে প্রায় 40° অক্ষাংশ পর্যন্ত তীব্রতা নিরবচ্ছিন্ন ভাবে বৃদ্ধি পায়। উচ্চতর অক্ষাংশে তীব্রতা প্রায় অপরিবর্তিত থাকে। এখানে উল্লেখযোগ্য যে (20·3) চিত্রে নির্দেশিত অক্ষাংশসমূহ ভৌগলিক অক্ষাংশ নয়, ভূচুম্বকীয় অক্ষাংশ (Geomagnetic Latitude)। সমুদ্রপৃষ্ঠে 0° থেকে 40° অক্ষাংশ পর্যন্ত তীব্রতা বৃদ্ধির মান প্রায় 10% হয়। বায়ুমণ্ডলের ঊর্ধ্ব-স্তরে আরও বেশী পরিবর্তন পাওয়া যায়। এই সব ঊর্ধ্বস্তরে 0° থেকে 55° অক্ষাংশ পর্যন্ত তীব্রতা বৃদ্ধি লক্ষ্য করা যায় ; উচ্চতর অক্ষাংশে তীব্রতা প্রায় অপরিবর্তিত থাকে।

অক্ষাংশের সংগে মহাজাগতিক রশ্মির তীব্রতা পরিবর্তন থেকে প্রতীয়মান হয় যে মহাশূন্য থেকে আগত এই বিকিরণ প্রধানতঃ উচ্চশক্তি আহিত কণিকার দ্বারা গঠিত। পৃথিবীর চৌম্বক ক্ষেত্রের দ্বারা এই সব কণিকার বিচ্যুতির ফলে

অক্ষাংশের সংগে তীব্রতার উপরোক্ত পরিবর্তন ঘটে থাকে। মেরু প্রদেশে দৃষ্ট মেরু-জ্যোতির (Aurora Borealis) উৎপত্তি ব্যাখ্যা করার জন্য ষ্টোয়্রমার (Störmer) নামক নরওয়েজীয় বিজ্ঞানী সর্বপ্রথম ১৯১৭ সালে পৃথিবীর চৌম্বক ক্ষেত্রে উচ্চশক্তি ইলেকট্রনের গতি সম্বন্ধে একটি তত্ত্ব উদ্ভাবিত করেন। তাঁর মতানুসারে সূর্য থেকে আগত উচ্চশক্তি ইলেকট্রনগুলি বায়ুমণ্ডলের উপরিভাগে গ্যাস অণুগুলিকে উত্তেজিত করার ফলে মেরু-জ্যোতির উৎপত্তি হয়। পৃথিবীর চৌম্বক ক্ষেত্রের দ্বারা বিচ্যুত হওয়ার ফলে এই সব ইলেকট্রন কেবল মেরু অঞ্চলেই মেরু-জ্যোতি সৃষ্টি করতে পারে। মহাজাগতিক রশ্মির ক্ষেত্রে উক্ত তত্ত্বের প্রয়োগ করেন লেমেয়্টার এবং ভ্যালার্টা (Lamaitre and Vallarta) নামক মেক্সিকান বিজ্ঞানীদ্বয় (১৯৩৩-১৯৩৬ সালে)। পৃথিবীর চৌম্বক ক্ষেত্রের প্রকৃতি সাধারণতঃ ভূকেন্দ্রে অবস্থিত একটি দ্বিমেরুর (Dipole) চৌম্বক ক্ষেত্রের সমতুল্য বলে কল্পনা করা হয়। এই ক্ষেত্র ভূপৃষ্ঠ থেকে কয়েক সহস্র কিলোমিটার পর্যন্ত বিস্তৃত হয়। মহাজাগতিক রশ্মি মধ্যস্থ মুখ্য (Primary) আহিত কণিকাগুলি বিভিন্ন দিক থেকে পৃথিবীর দিকে আসার পথে এই চৌম্বক ক্ষেত্রের মধ্যে দীর্ঘ পথ অতিক্রম করার সময়ে উক্ত ক্ষেত্রের ক্রিয়ার ফলে বিচ্যুত হয়। এর পর তারা পৃথিবীর বায়ুমণ্ডলের ঊর্ধ্বতর স্তরের উপরে আপতিত হয়। বায়ুমণ্ডলের বিস্তৃতি চৌম্বক ক্ষেত্রের বিস্তৃতি অপেক্ষা অনেক কম হয়। ভূপৃষ্ঠ থেকে 25 কিলোমিটারের মধ্যে শতকরা 97 ভাগ পরিমাণ বায়ুস্তর আবদ্ধ থাকে। সুতরাং বায়ুমণ্ডলের মধ্যে মহাজাগতিক রশ্মির কণিকাসমূহের বিচ্যুতি অনেক কম হয়।

বায়ুমণ্ডলের উপরে কণিকাগুলি বিভিন্ন দিক থেকে আপতিত হয়। যে সব কণিকা ভূপৃষ্ঠের সংগে লম্বভাবে আপতিত হয় সেগুলিকে বায়ুমণ্ডলের মধ্যে ন্যূনতম পথ পরিভ্রমণ করতে হয়; ফলে বায়ুস্তরসমূহের মধ্যে তাদের শোষণও ন্যূনতম হয়। অন্যান্য দিক থেকে আগত কণিকাগুলিকে বায়ুমণ্ডলের মধ্যে দীর্ঘতর পথ অতিক্রম করতে হয়, যার ফলে সেগুলি বেশী পরিমাণে শোষিত হয়।

এখন ভূপৃষ্ঠের দিকে লম্বভাবে অগ্রসরমান কণিকাগুলির কথা বিবেচনা করা যাক। ভূচুম্বকীয় বিষুব অঞ্চলে এই সব কণিকা পৃথিবীর চৌম্বক বলরেখাসমূহের সংগে লম্বভাবে পরিভ্রমণ করে। ফলে এদের উপরে ক্রিয়াশীল চৌম্বক বল উচ্চতম হয় এবং এদের বিচ্যুতিও উচ্চতম হয়। অপেক্ষাকৃত নিম্নশক্তি কণিকাগুলির বিচ্যুতি এত বেশী হয় যে সেগুলি পৃথিবী

পর্যন্ত পৌঁছতে পারে না। বস্তুতঃ $10^{10}$ ইলেকট্রন-ভোল্ট অপেক্ষা কম শক্তি সম্পন্ন কণিকাসমূহ কোন দিক থেকেই পৃথিবীর বিষুব অঞ্চলে উপস্থিত হতে পারে না। উচ্চতর শক্তি সম্পন্ন কণিকাগুলির বিচ্যুতি কম হওয়ার জন্য এরা ভূপৃষ্ঠে ( প্রকৃতপক্ষে বায়ুমণ্ডলের ঊর্ধ্বস্তরে ) বিষুব অঞ্চলে উপস্থিত হতে পারে ( 20·4 চিত্র দ্রষ্টব্য )।

চিত্র 20·4

ভূচুম্বকীয় ক্ষেত্রের প্রভাবে বিষুববৃত্ত তলে ধনাত্মক মহাজাগতিক কণিকারাজির কক্ষপথের নিদর্শন।

(*a*) বিভিন্ন সংঘাত দূরত্বে আগত 59 জি-ই-ভো আদি শক্তি সম্পন্ন প্রোটনের কক্ষপথসমূহ।

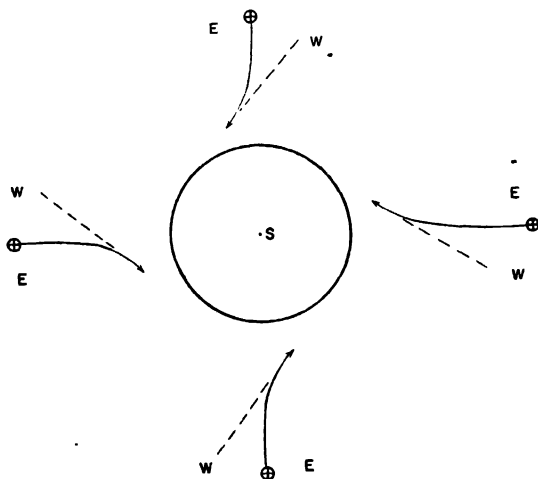
(*b*) উচ্চ এবং নিম্ন শক্তি সম্পন্ন প্রোটনের কক্ষপথ। লক্ষণীয় যে নিম্নশক্তি কণিকাগুলি ভূচুম্বকীয় ক্ষেত্রের প্রভাবে এত বেশী বিচ্যুত হয়ে যায় যে তারা বিষুব অঞ্চলে ভূপৃষ্ঠে উপস্থিত হতে পারে না।

ভূচুম্বকীয় মেরু অঞ্চলে উল্লম্ব (Vertical) রেখা ধরে পৃথিবীর দিকে অগ্রসরমান কণিকাগুলি চৌম্বক বলরেখাসমূহের সমান্তরালে পরিভ্রমণ করে। ফলে তাদের উপরে কোন চৌম্বক বল ক্রিয়া করে না। অপরপক্ষে চৌম্বক বলরেখাসমূহের সংগে অল্প কোণে পরিভ্রমণশীল কণিকাগুলি সর্পিল (Spiral) পথ ধরে অগ্রসর হয়। এক্ষেত্রে শুধু উচ্চশক্তি কণিকা নয়, অনেক নিম্নতর শক্তিসম্পন্ন কণিকাও ভূপৃষ্ঠে উপস্থিত হতে পারে। সেজন্য মেরু অঞ্চলে মহাজাগতিক রশ্মির তীব্রতা বিষুব অঞ্চল অপেক্ষা অনেক বেশী হয়। (20·4) চিত্রে বিভিন্ন ক্ষেত্রে কণিকাগুলির সম্ভাব্য পথ প্রদর্শিত হয়েছে।

উপরের আলোচনা থেকে মেরু অঞ্চল অপেক্ষা বিষুব অঞ্চলে মহাজাগতিক রশ্মির তীব্রতা বৃদ্ধির কারণ বুঝতে পারা যায়। প্রকৃতপক্ষে সমগ্র ব্যাপারটি অত্যন্ত জটিল। মহাজাগতিক রশ্মির মধ্যে বর্তমান কণিকাগুলি সব সমশক্তি হয় না। এদের শক্তি বিস্তীর্ণ সীমার মধ্যে বিস্তৃত থাকে। তাছাড়া পৃথিবীর চৌম্বক ক্ষেত্রে যে কোন স্থানে এরা প্রবেশ করে বিভিন্ন দিক থেকে। এই সমস্ত তথ্য বিচার করে লেমেয়্‌টার এবং ভ্যালার্টা তাঁদের তত্ত্ব উদ্‌ভাবিত করেন। প্রকৃতপক্ষে এই তত্ত্ব বায়ুমণ্ডলের ঊর্ধ্বে আপতিত মুখ্য (Primary) মহাজাগতিক রশ্মির ক্ষেত্রে ঠিক ভাবে প্রযোজ্য। সমুদ্রপৃষ্ঠে দৃষ্ট মহাজাগতিক রশ্মির ক্ষেত্রে এই তত্ত্বের সার্থক প্রয়োগ সম্ভব নয়; কারণ এক্ষেত্রে যে মহাজাগতিক রশ্মি দেখা যায় তা হচ্ছে বায়ুমণ্ডলের বিভিন্ন প্রকার গ্যাস অণুর সংগে মুখ্য (Primary) কণিকাগুলির বিক্রিয়ার ফলে সৃষ্ট গৌণ (Secondary) বিকিরণ। বায়ুমণ্ডলের ঊর্ধ্বমুখী বিস্তার অপেক্ষাকৃত অনেক কম হওয়ার জন্য সমুদ্রপৃষ্ঠ পর্যন্ত নেমে আসার সময়ে এই গৌণ বিকিরণকে চৌম্বক ক্ষেত্রের মধ্যে অনেক কম পথ অতিক্রম করতে হয়। ফলে এদের উপরে চৌম্বক ক্ষেত্রের প্রভাব স্বল্পতর হয়। মেরু অঞ্চলে অপেক্ষাকৃত নিম্নশক্তি মুখ্য কণিকাগুলি যদিও চৌম্বক ক্ষেত্র অতিক্রম করে বায়ুমণ্ডলের উপরিভাগ পর্যন্ত উপস্থিত হতে পারে, এদের দ্বারা সৃষ্ট গৌণ কণিকাসমূহ বায়ুমণ্ডল ভেদ করে সমুদ্রপৃষ্ঠে উপস্থিত হতে পারে না। বিষুব এবং মেরু, উভয় অঞ্চলেই কেবল অপেক্ষাকৃত উচ্চতর শক্তি সম্পন্ন মুখ্য কণিকাগুলির দ্বারা সৃষ্ট গৌণ বিকিরণ বায়ুমণ্ডল ভেদ করে সমুদ্রপৃষ্ঠে উপস্থিত হতে পারে। উপরের আলোচনায় দেখা গেছে যে এই দুই অঞ্চলের মধ্যে এইরূপ উচ্চশক্তি কণিকার সংখ্যার খুব বেশী তারতম্য থাকে না। সেজন্য সমুদ্রপৃষ্ঠে অক্ষাংশের সংগে মহাজাগতিক রশ্মির তীব্রতার অনেক কম পরিবর্তন পাওয়া যায়। অপরপক্ষে বায়ুমণ্ডলের উপরিভাগে বিষুব অঞ্চল অপেক্ষা মেরু অঞ্চলে অপেক্ষাকৃত অনেক বেশী সংখ্যক নিম্নশক্তি মুখ্য কণিকা বা তাদের দ্বারা সৃষ্ট গৌণ কণিকা দেখা যায়। সেইজন্য এক্ষেত্রে অক্ষাংশের সংগে মহাজাগতিক রশ্মির তীব্রতার অনেক বেশী পরিবর্তন লক্ষিত হয়।

### 20·4 : পূর্ব-পশ্চিম ক্রিয়া

অক্ষাংশের সংগে মহাজাগতিক রশ্মির তীব্রতা পরিবর্তন থেকে সর্বাপেক্ষা গুরুত্বপূর্ণ সিদ্ধান্ত হচ্ছে যে মুখ্য মহাজাগতিক রশ্মি প্রধানতঃ আহিত কণিকার দ্বারা গঠিত, একথা পূর্বেই উল্লেখ করা হয়েছে। এই কণিকাগুলির প্রকৃতি

সম্বন্ধে কিছুটা আভাস পাওয়া যায় তথাকথিত পূর্ব-পশ্চিম ক্রিয়া থেকে। ভূচুম্বকীয় বিষুব অঞ্চলে (Geomagnetic Equator) মহাজাগতিক রশ্মির আগমন পথ লক্ষ্য করলে দেখা যায় যে পশ্চিম দিক থেকে আগত কণিকার সংখ্যা পূর্ব দিক থেকে আগত কণিকার তুলনায় কিছু বেশী হয়। একেই বলা হয় 'পূর্ব-পশ্চিম ক্রিয়া' (East-West Effect)। এই ক্রিয়া সমুদ্রপৃষ্ঠ অপেক্ষা ঊর্ধ্বতর বায়ুমণ্ডলে অনেক বেশী পরিমাণে দেখা যায়। (20·5) চিত্রের

চিত্র 20·5

পূর্ব-পশ্চিম ক্রিয়ার ব্যাখ্যা। ভূচুম্বকীয় ক্ষেত্র চিত্রতলের অভিলম্বে নীচের থেকে উপরের দিকে ক্রিয়াশীল। W এবং E যে কোন বিন্দুতে পশ্চিম ও পূর্ব দিক নির্দেশ করে। তীর চিহ্নিত বক্ররেখা ভূচুম্বকীয় ক্ষেত্রে ধনাত্মক কণিকার ভ্রমণপথ নির্দেশ করে। ভূপৃষ্ঠের নিরীক্ষকের মনে হবে যে কণিকাটি ভগ্নরেখা চিহ্নিত দিক থেকে আপতিত হয়।

সাহায্যে এর কারণ ব্যাখ্যা করা সম্ভব। এই চিত্রে ভূচুম্বকীয় বিষুব-বৃত্তের উপরে আপতিত আহিত কণিকার পরিভ্রমণ পথের নিদর্শন দেখান হয়েছে। চিত্রতলের নীচের দিকে দক্ষিণমেরুর অবস্থান কল্পনা করলে দেখা যায় যে যদি মুখ্য মহাজাগতিক কণিকাগুলি ধনাত্মক আধানবাহী হয়, তাহলে সেগুলি পৃথিবীর চৌম্বক ক্ষেত্র দ্বারা এমন ভাবে বিচ্যুত হবে যে সেগুলির বেশীর ভাগই পশ্চিম

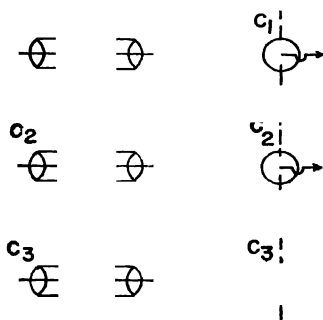
দিক (W) থেকে ভূপৃষ্ঠে আপতিত হয় বলে বোধ হবে। অপরপক্ষে মুখ্য কণিকাগুলি ঋণাত্মক আধানবাহী হলে সেগুলির বেশীর ভাগই পূর্ব দিক (E) থেকে আপতিত হয় বলে বোধ হবে। যেহেতু প্রকৃতপক্ষে পশ্চিম দিক থেকে আগত কণিকার সংখ্যা অপেক্ষাকৃত বেশী হয়, অতএব অনুমান করা যায় যে মুখ্য মহাজাগতিক কণিকাগুলি প্রধানতঃ ধনাত্মক আধানবাহী। পরবর্তী যুগে বেলুন এবং রকেটের সাহায্যে ঊর্ধ্বাকাশে ( 30,000 মি বা আরও ঊর্ধ্বে ) ফোটোগ্রাফিক প্লেট প্রেরণ করে কণিকাগুলির উপরোক্ত প্রকৃতি সম্বন্ধে প্রত্যক্ষ প্রমাণ পাওয়া যায় ( 20·13 অনুচ্ছেদ দ্রষ্টব্য )।

## 20·5 : মহাজাগতিক রশ্মি সম্পর্কীয় গবেষণায় ব্যবহৃত যন্ত্রাবলী

মহাজাগতিক রশ্মি সম্পর্কীয় গবেষণায় প্রাথমিক যুগে প্রধানতঃ তড়িৎ-বীক্ষণ (Electroscope) এবং আয়নন-কক্ষ (Ionization Chamber) ব্যবহার করা হত। পরবর্তী যুগে গাইগার-মূলার সংখ্যায়ক (Geiger-Müller Counter), মেঘ-কক্ষ (Cloud Chamber), কেন্দ্রকীয় অবদ্রব (Nuclear Emulsion) ফোটোগ্রাফিক প্লেট, বুদ্‌বুদ-কক্ষ (Bubble Chamber), স্ফুলিংগ-কক্ষ (Spark Chamber), চমক সংখ্যায়ক প্রভৃতি যন্ত্রও বহুল পরিমাণে ব্যবহৃত হয়। এগুলি সম্বন্ধে পঞ্চদশ পরিচ্ছেদে আলোচনা করা হয়েছে। মহাজাগতিক রশ্মি সম্পর্কিত পরীক্ষায় এদের মধ্যে কতকগুলি ব্যবহারের জন্য নিম্নে আলোচিত বিশেষ বিশেষ ধরনের যান্ত্রিক কৌশল (Techniques) উদ্‌ভব করা হয়েছে।

### (ক) সমাপতন সংখ্যায়ন

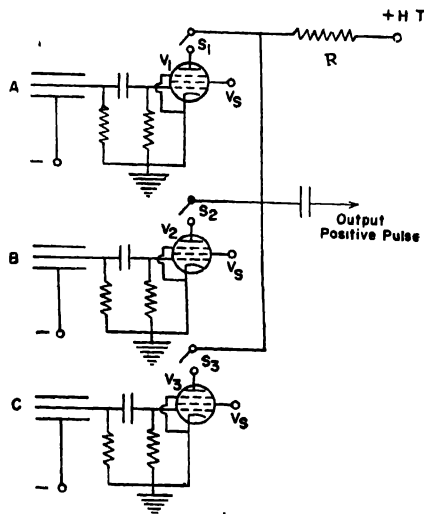
সর্বাগ্রে উল্লেখযোগ্য হচ্ছে সমাপতন ব্যবস্থা (Coincidence Arrangement) সম্পন্ন একাধিক গাইগার-মূলার সংখ্যায়কের ব্যবহার। এই ব্যবস্থায় দুই বা ততোধিক সংখ্যায়ক এমনভাবে বিন্যস্ত থাকে যে একটি শক্তিশালী মহাজাগতিক কণিকা এদের মধ্য দিয়ে অত্যল্প কালের মধ্যে ( অর্থাৎ প্রায় একই সময়ে ) পার হয়ে যায়। (20·6) চিত্রে $C_1$, $C_2$, $C_3$ তিনটি উপর উপর স্থাপিত গাইগার-মূলার সংখ্যায়ক প্রদর্শিত হয়েছে। এক্ষেত্রে উল্লম্ব ছাড়া অন্য দিকে থেকে আগত কোন একক (Single) কণিকার পক্ষে তিনটি সংখ্যায়কের মধ্য দিয়ে ভ্রমণ করা সম্ভব নয়। অপরপক্ষে প্রায় উল্লম্ব দিক থেকে আগত একটি মাত্র কণিকার পক্ষে তিনটি সংখ্যায়কের মধ্য দিয়ে পরিভ্রমণ করা সম্ভব। ফলে সংখ্যায়ক তিনটির মধ্যে প্রায় সমকালীন তিনটি

তড়িৎ-ঝলক (Pules) সৃষ্ট হয়। বিশেষ ধরনের ইলেকট্রনিক বর্তনীর সাহায্যে এইরূপ তিনটি সমকালীন তড়িৎ-ঝলক নির্দেশিত এবং এদের সংখ্যা গণনা করার ব্যবস্থা করা যায়।

চিত্র 20·6

গাইগার-মূলার সংখ্যায়ক দূরবীক্ষণ। ডান দিকের চিত্রে সংখ্যায়কগুলির প্রান্তিক প্রস্থচ্ছেদ চিত্র দেখান হয়েছে।

(20·7) চিত্রে রসি (Bruno Rossi) কর্তৃক উদ্ভাবিত এইরূপ একটি সমাপতন বর্তনী (Coincidence Circuit) প্রদর্শিত হয়েছে। A, B এবং C তিনটি গাইগার-মূলার সংখ্যায়কের অক্ষীয় তারগুলি (অর্থাৎ অ্যানোডগুলি) তিনটি খুব নিম্ন ধারকত্ব (Capacity) সম্পন্ন ধারকের (Condensers) এক প্রান্তে সংযুক্ত থাকে। ধারকগুলির অপর প্রান্ত যথাক্রমে $V_1$, $V_2$, এবং $V_3$ পেণ্টোড (Pentode) ভাল্‌ভের তিনটি গ্রিডের (Grid) সংগে সংযুক্ত করা থাকে। ভাল্‌ভ তিনটির অ্যানোডগুলি $S_1$, $S_2$, $S_3$ তিনটি সুইচের (Switch) মধ্য দিয়ে একটি উচ্চমান রোধের (Load Resistance) সংগে সংযুক্ত করা হয়। যদি সুইচ তিনটি বন্ধ করা থাকে তাহলে তিনটি ভাল্‌ভের মধ্য দিয়ে তড়িৎ প্রবাহ চলতে থাকে। এই অবস্থায় সংখ্যায়কগুলির অ্যানোড থেকে ঋণাত্মক তড়িৎ-ঝলক (Negative Pulse) ভাল্‌ভ তিনটির গ্রিডে যদি একই সময়ে উপস্থিত হয় তাহলে তিনটি ভাল্‌ভের মধ্যেই তড়িৎ প্রবাহ অল্পক্ষণের জন্য বন্ধ হয়ে যায়। ফলে তিনটি প্লেট সংযুক্ত সাধারণ রোধের (R) যে প্রান্তটি সুইচ তিনটির সংগে সংযুক্ত থাকে, সেই প্রান্তের বিভব সহসা খুব বৃদ্ধি পায়। এই ক্ষণস্থায়ী বিভব-

বর্ধনের ফলে একটি ধনাত্মক তড়িৎ-ঝলক সৃষ্ট হয়। উপযুক্ত ইলেকট্রনিক পদ্ধতিতে এই ঝলকটি পরিবর্ধিত এবং নির্দেশিত করা যায়।

এখানে উল্লেখযোগ্য যে অ্যানোড সংযুক্ত রোধের মান ভাল্‌ভগুলির আভ্যন্তরীণ রোধের (Internal Resistance) তুলনায় যথেষ্ট উচ্চ হওয়া প্রয়োজন।

চিত্র 20·7
রসি সমাপতন বর্তনী।

সাধারণতঃ প্রায় মেগোহ্‌ম ($1\,\text{Megohm} = 10^6\,\text{ohm}$) মাত্রার রোধ ব্যবহার করা হয়। ফলে সব কয়টি ভাল্‌ভের পরিবাহী অবস্থায় যে পরিমাণ তড়িৎ প্রবাহ R রোধের মধ্য দিয়ে প্রবাহিত হয়, এদের মধ্যে একটি বা দুটি ভাল্‌ভ অপরিবাহী অবস্থায় থাকলেও প্রায় একই পরিমাণ তড়িৎ প্রবাহ R-এর মধ্য দিয়ে প্রবাহিত হয়। যদি A, B, C সংখ্যায়ক তিনটির মধ্যে একটি বা দুটির ভিতর দিয়ে কোন আয়ন-উৎপাদক রশ্মি একই সংগে পরিভ্রমণ করে তাহলে এদের আনোডে উৎপন্ন ঋণাত্মক তড়িৎ-ঝলক কেবল একটি বা দুটি ভাল্‌ভকেই অপরিবাহী অবস্থা প্রাপ্ত করায়। স্পষ্টতঃ এই অবস্থায় R রোধের সুইচ সংলগ্ন প্রান্তের বিভবের খুব বেশী পরিবর্তন হয় না। ফলে এক্ষেত্রে কোন নির্দেশযোগ্য ধনাত্মক তড়িৎ-ঝলক উৎপন্ন হয় না। কেবল তিনটি ভাল্‌ভ একযোগে অপরিবাহী অবস্থা প্রাপ্ত হলেই উপরে বর্ণিত পদ্ধতিতে ধনাত্মক তড়িৎ-ঝলক উৎপন্ন হয়।

সমাপতন ব্যবস্থা (Coincidence Arrangement) ব্যবহার করার

সুবিধা হচ্ছে যে যখন সবগুলি সংখ্যায়কের মধ্যে দিয়ে প্রায় একই সংগে এক ( বা একাধিক ) আয়ন-উৎপাদক বিকিরণ পরিভ্রমণ করে কেবল তখনই একটি নির্দেশযোগ্য তড়িৎ-ঝলক উৎপন্ন হয়। মহাজাগতিক রশ্মি মধ্যস্থ কণিকাগুলির বেগ আলোকের বেগের সমমাত্রিক হয়, অর্থাৎ $10^9$ সেমি/সেকেণ্ড অপেক্ষা বেশী হয়। কয়েক সেণ্টিমিটার ব্যবধানে স্থাপিত সংখ্যায়কগুলিকে ভেদ করে চলে যেতে এদের সময় লাগে $10^{-6}$ সেকেণ্ড অপেক্ষাও কম। সুতরাং এক্ষেত্রে সহজেই সমাপতন জনিত তড়িৎ-ঝলক (Coincidence Pulse) উৎপন্ন হতে পারে।

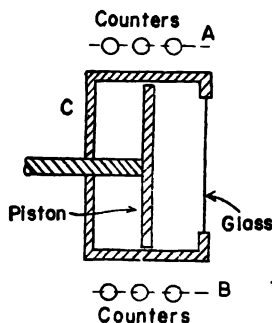
রসি সমাপতন বর্তনী (Rossi Coincidence Circuit) সাধারণতঃ মন্থর হারে আগত বিকিরণের ক্ষেত্রে ( যথা মহাজাগতিক রশ্মির ক্ষেত্রে ) ব্যবহার্য। তেজস্ক্রিয় বিঘটন বা কেন্দ্রক বিক্রিয়া সম্পর্কিত নানাবিধ পরীক্ষায় সমাপতন বর্তনী ব্যবহার করা হয়। এক্ষেত্রে দ্রুত ক্রিয়াশীল সমাপতন বর্তনী ব্যবহার করা প্রয়োজন। বর্তমানে ট্রানজিস্টার ডায়োড ব্যবহার করে নানাবিধ দ্রুত ক্রিয়াশীল সমাপতন বর্তনী উদ্ভাবিত হয়েছে। তাছাড়া দুটি সংখ্যায়কের মধ্যে একটি থেকে প্রাপ্ত তড়িৎ-ঝলককে বিলম্বিত (Delayed) করার ব্যবস্থাও করা যায়। এইরূপ বিলম্বিত সমাপতন বর্তনী (Delayed Coincidence Circuit) ব্যবহার করে খুব নিম্ন অর্ধজীবনকাল (Half Life) পরিমাপ করা যায়। এখানে উল্লেখযোগ্য যে গাইগার-মূলার সংখ্যায়কের পরিবর্তে চমক-সংখ্যায়ক (Scintillation Counter) ব্যবহার করেও সমাপতন পরীক্ষা (Coincidence Experiment) অনুষ্ঠিত করা যায়। যে সব ক্ষেত্রে দ্রুত ক্রিয়াশীল সমাপতন ব্যবস্থার প্রয়োজন, সেক্ষেত্রে চমক-সংখ্যায়ক ব্যবহার করা সুবিধাজনক।

মহাজাগতিক রশ্মি সংক্রান্ত গবেষণার পক্ষে প্রয়োজনীয় আর এক প্রকার বর্তনী হচ্ছে বিষমাপতন বর্তনী (Anti Coincidence Circuit) এক্ষেত্রে এমন ব্যবস্থা অবলম্বন করা হয় যে যদি পূর্বের মত উপর উপর তিনটি ( বা ততোধিক ) সংখ্যায়ক স্থাপিত থাকে, তাহলে কেবল উপরের দুটির মধ্য দিয়ে যদি একটি আয়ন উৎপাদক কণিকা পরিভ্রমণ করে প্রায় সমকালীন দুটি তড়িৎ-ঝলক উৎপন্ন করে তাহলে সেগুলি উপরোক্ত পদ্ধতিতে সমাপতন ঝলক (Coincidence Pulse) উৎপন্ন করবে। কিন্তু যদি কণিকাটি সবগুলি সংখ্যায়কের মধ্য দিয়ে পরিভ্রমণ করে প্রত্যেকটির মধ্যে সমকালীন তড়িৎ-ঝলক উৎপন্ন করে, তাহলে কোন সমাপতন ঝলক উৎপন্ন হবে না।

### (খ) সংখ্যায়ক নিয়ন্ত্রিত মেঘ-কক্ষ

মহাজাগতিক রশ্মি সংক্রান্ত গবেষণায় উইলসন মেঘ-কক্ষের ভূমিকা খুবই গুরুত্বপূর্ণ। সমুদ্রপৃষ্ঠে এবং বায়ুমণ্ডলের বিভিন্ন উচ্চতায় মেঘ-কক্ষের সাহায্যে নানারূপ গুরুত্বপূর্ণ পরীক্ষা অনুষ্ঠিত হয়েছে। মহাজাগতিক রশ্মি মধ্যস্থ কণিকাগুলি সর্বক্ষণ যদৃচ্ছভাবে (At Random) ভূপৃষ্ঠে উপস্থিত হয়। এদের মধ্যে যখন কোন আহিত কণিকা মেঘ-কক্ষের গ্যাসের মধ্য দিয়ে পরিভ্রমণ কালে আয়ন উৎপন্ন করে ঠিক সেই সময়ে কক্ষ মধ্যস্থ গ্যাসকে প্রসারিত করে কণিকাটির ভ্রমণপথকে (Track) দৃশ্যমান করে তোলা যায় এবং উপযুক্ত ব্যবস্থা অবলম্বন করে উক্ত ভ্রমণপথের আলোকচিত্র গ্রহণ করা যায় (15·2 অনুচ্ছেদ দ্রষ্টব্য)। যেহেতু মহাজাগতিক কণিকাগুলি যদৃচ্ছভাবে আসতে থাকে, সুতরাং ঠিক কোন সময়ে মেঘ-কক্ষের গ্যাসকে প্রসারিত করতে হবে তা জানা থাকে না। ফলে যদি মেঘ-কক্ষের গ্যাসকে বারবার প্রসারিত করা যায় এবং প্রত্যেকবার একটি করে ফোটোগ্রাফিক ফিল্‌মকে আলোকোদ্‌ভাসিত করা যায়, তাহলে প্রাপ্ত আলোকচিত্রগুলির মধ্যে অতি অল্প সংখ্যক চিত্রেই মহাজাগতিক কণিকার ভ্রমণপথ দেখতে পাওয়া যাবে। বেশীর ভাগ চিত্রই কার্যোপযোগী হবে না।

এই অসুবিধা দূর করার জন্য বৃটিশ বিজ্ঞানী ব্ল্যাকেট (P.M.S. Blackett) গাইগার-মূলার সংখ্যায়ক দ্বারা নিয়ন্ত্রিত মেঘ-কক্ষ (Counter Con-

চিত্র 20·8
সংখ্যায়ক নিয়ন্ত্রিত মেঘ-কক্ষের চিত্ররূপ।

trolled Cloud Chamber) ব্যবহারের কৌশল উদ্‌ভাবিত করেন। (20·8) চিত্রে ব্ল্যাকেট কর্তৃক উদ্‌ভাবিত এই পরীক্ষা ব্যবস্থা প্রদর্শিত হয়েছে।

C মেঘ-কক্ষের উপরে এবং নীচে দুই সারি গাইগার-মুলার সংখ্যায়ক A এবং B স্থাপিত থাকে। স্পষ্টতঃ কোন মহাজাগতিক কণিকাকে A এবং B সংখ্যায়ক সারির মধ্য দিয়ে পরিভ্রমণ করতে হলে C মেঘ-কক্ষটিকেও প্রায় একই সময়ে পার হয়ে যেতে হবে। যদি A ও B সংখ্যায়ক সারি দুটিকে একটি সমাপতন বর্তনীর সংগে সংযুক্ত করা হয় এবং সমাপতন ঝলক (Coincidence Pulse) দ্বারা একটি তড়িৎচুম্বকীয় রীলে (Relay) পরিচালিত করে মেঘ-কক্ষের গ্যাসকে প্রসারিত করা যায়, তাহলে এইরূপ প্রসারণ কেবল তখনই ঘটবে যখন কোন আহিত কণিকা সংখ্যায়ক সারি দুটি ও মেঘ-কক্ষের মধ্য দিয়ে পরিভ্রমণ করে যাবে। যান্ত্রিক ব্যবস্থার সাহায্যে প্রায় ঠিক একই সময়ে যদি একটি আলোকচিত্র গ্রহণ করা হয়, তাহলে প্রত্যেকটি চিত্রেই মহাজাগতিক কণিকার ভ্রমণপথ দেখতে পাওয়া যাবে।

উইলসন মেঘ-কক্ষের সাহায্যে শুধু যে কক্ষের মধ্য দিয়ে পরিভ্রমণরত বহিরাগত কণিকার ভ্রমণপথের (Track) আলোকচিত্র পাওয়া সম্ভব তাই নয়, মেঘ-কক্ষের মধ্যে কোন ধাতু নির্মিত প্লেট (লোহা, সীসা, সোনা, ইত্যাদি) স্থাপিত করে উক্ত ধাতুর পরমাণুগুলির সংগে মহাজাগতিক রশ্মির বিক্রিয়ার ফলে সৃষ্ট কণিকাসমূহের আলোকচিত্রও পাওয়া সম্ভব।

**(গ) কেন্দ্রকীয় অবদ্রব ফোটোগ্রাফিক প্লেট**

মহাজাগতিক রশ্মি সংক্রান্ত গবেষণায় কেন্দ্রকীয় অবদ্রব ফোটোগ্রাফিক প্লেটের (Nuclear Emulsion Photographic Plate) অবদান বিশেষভাবে উল্লেখযোগ্য। যেহেতু মহাজাগতিক কণিকাগুলি খুব উচ্চ শক্তি সম্পন্ন হয় ($>10^9$ ই-ভো), অতএব যথেষ্ট পুরু অবদ্রব ব্যবহার না করলে এইরূপ কণিকার সম্পূর্ণ ভ্রমণপথের চিত্র পাওয়া সম্ভব নয়। ইংলণ্ডের ইল্‌ফোর্ড (Ilford) কোম্পানী এবং আমেরিকার কোডাক (Kodak) কোম্পানী 50 মাইক্রন ( 1 মাইক্রন $=10^{-4}$ সেমি ) থেকে 1000 মাইক্রন পর্যন্ত পুরুত্ব সম্পন্ন এই জাতীয় প্লেট নির্মাণ করে থাকেন। তাছাড়া অনেক সময়ে কাঁচের প্লেট থেকে ছাড়িয়ে নেওয়া শুধু ফোটোগ্রাফিক অবদ্রবও (Photographic Emulsion) ব্যবহার করা হয়। এইরূপ অনেকগুলি অবদ্রব উপরে উপরে স্থাপিত করে কয়েক সেণ্টিমিটার পর্যন্ত পুরু অবদ্রবের স্তূপ (Stack) প্রস্তুত করা যায়। এইরূপ অবদ্রব স্তূপ ব্যবহার করে অত্যুচ্চ শক্তি সম্পন্ন ($10^{15}-10^{18}$ ই-ভো) মহাজাগতিক রশ্মি সংক্রান্ত পরীক্ষা অনুষ্ঠিত করা হয়।

চিত্র 20·9

পজিট্রন আবিষ্কার।

## 20·6 : পজিট্রনের আবিষ্কার

ইতিপূর্বে (13·6) অনুচ্ছেদে পজিট্রনের কথা উল্লেখ করা হয়েছে এবং এর ধর্মাবলী সম্বন্ধে আলোচনা করা হয়েছে। পজিট্রন হচ্ছে ইলেকট্রনের বিপরীত কণিকা। ১৯২৮ সালে ডিরাক (Dirac) তাঁর ইলেকট্রন তত্ত্ব উদ্‌ভাবন কালে এইরূপ একটি কণিকার কল্পনা করেন, যদিও সে সময় এর অস্তিত্বের কোন পরীক্ষামূলক প্রমাণ ছিল না।

১৯৩৩ সালে আমেরিকান বিজ্ঞানী অ্যান্‌ডারসন (C. D. Anderson) মহাজাগতিক রশ্মি সংক্রান্ত গবেষণা কালে পজিট্রন আবিষ্কার করেন। তিনি একটি মেঘ-কক্ষকে খুব প্রবল চৌম্বক ক্ষেত্রের (15,000 গাওস ) মধ্যে স্থাপিত করে এর সাহায্যে কতকগুলি আলোকচিত্র গ্রহণ করেন। এদের মধ্যে কোন কোন চিত্রে বিপরীত বক্রতা সম্পন্ন অত্যুচ্চ শক্তির কণিকা ভ্রমণপথের নিদর্শন পাওয়া যায়। চৌম্বক ক্ষেত্রের প্রভাবে কণিকাগুলির ভ্রমণপথ বক্র হয়। এদের বিপরীতমুখী বক্রতা থেকে বোঝা যায় যে এদের মধ্যে ধনাত্মক ও ঋণাত্মক আধান সম্পন্ন কণিকা আছে। মেঘ-কক্ষের গ্যাসের মধ্যে উৎপন্ন আয়ননের পরিমাণ থেকে অনুমান করা হয় যে ঋণাত্মক কণিকাগুলি হচ্ছে ইলেকট্রন। ধনাত্মক কণিকাগুলির ভ্রমণপথের আয়নন ঘনত্বও ঋণাত্মক কণিকাগুলির ভ্রমণ-পথের আয়নন ঘনত্বের সমান হতে দেখা যায়। এর থেকে অনুমান করা হয় যে এগুলির ভর ইলেকট্রনের ভরের সমান। অবশ্য এই দ্বিতীয় শ্রেণীর ভ্রমণপথগুলি অন্য আর এক ভাবেও উৎপন্ন হতে পারে। যদি একটি ইলেকট্রন বিপরীত দিক থেকে অগ্রসর হয় তাহলে তার ভ্রমণপথের বক্রতা প্রথমটির বিপরীতমুখী হতে পারে। অর্থাৎ এই কণিকাগুলিও প্রকৃতপক্ষে ঋণাত্মক ইলেকট্রন হতে পারে।

এই প্রশ্নের মীমাংসা করার জন্য অ্যান্‌ডারসন মেঘ-কক্ষের মধ্যে একটি 6 মিলিমিটার পুরু সীসার প্লেট স্থাপিত করে কতকগুলি আলোকচিত্র গ্রহণ করেন। প্লেটের যে কোন দিক থেকে আগত কোন শক্তিশালী কণিকা প্লেটের মধ্য দিয়ে পরিভ্রমণ কালে কিছু শক্তি এবং ভরবেগ ক্ষয় করে। ফলে প্লেটের দুই দিকে কণিকাটির ভ্রমণপথের চৌম্বক ক্ষেত্রজ বক্রতার পরিমাণ ভিন্ন হয়। (20·9) চিত্রে অ্যান্‌ডারসন কর্তৃক প্রাপ্ত এইরূপ একটি আলোকচিত্রের নিদর্শন দেখান হয়েছে। এক্ষেত্রে কণিকাটির ভ্রমণপথের বক্রতা প্লেটের নীচের দিকে কম এবং উপর দিকে বেশী হতে দেখা যায়। যেহেতু ভরবেগ

(Momentum) কম হলে বক্রতা বেশী হয়, অতএব (20·9) চিত্রে কণিকাটি নীচের থেকে উপরের দিকে পরিভ্রমণশীল বলে বোঝা যায়। কণিকাটির ভ্রমণপথের বক্রতা ব্যাসার্ধ এবং চৌম্বক ক্ষেত্র প্রাবল্যের গুণফল $Hr$ থেকে ভরবেগ $p$ পাওয়া যায় ঃ

$$pc = Her$$

এখানে $e$ হচ্ছে কণিকাটির আধান। প্লেটের নীচে এবং উপরে ভ্রমণপথের বক্রতা ব্যাসার্ধ (Radius of Curvature) পরিমাপ করে দেখা যায় যে কণিকাটির 63 মি-ই-ভো/$c$ আদি ভরবেগ সীসার প্লেটের মধ্যে পরিভ্রমণের ফলে কমে গিয়ে 23 মি-ই-ভো/$c$ হয়ে যায়। চৌম্বক ক্ষেত্রের অভিমুখ বিবেচনা করে অ্যান্‌ডারসন সিদ্ধান্ত করেন যে কণিকাটির আধান হচ্ছে ধনাত্মক। অ্যান্‌ডারসন প্রমাণ করেন যে এটি প্রোটন হতে পারে না। কারণ সীসার প্লেট থেকে নির্গমনের পর এর ভ্রমণপথের যা বক্রতা ব্যাসার্ধ পাওয়া যায় তার থেকে দেখা যায় যে এটি একটি প্রোটন হলে এর শক্তি হওয়া উচিত মাত্র 0·3 মি-ই-ভো। এত কম শক্তি সম্পন্ন প্রোটনের ভ্রমণপথ আলোকচিত্রে প্রাপ্ত ভ্রমণপথ অপেক্ষা অনেক বেশী স্থূল হওয়া উচিত। তাছাড়া মেঘ-কক্ষের গ্যাসে 0·3 মি-ই-ভো প্রোটনের পথসীমা (Range) হওয়া উচিত মাত্র 5 মিমি। প্রকৃতপক্ষে আলোকচিত্র থেকে পরিমাপ করে এই পথসীমা 50 সেমি অপেক্ষা বেশী পাওয়া যায়।

এইভাবে অ্যান্‌ডারসন সংশয়াতীতভাবে প্রমাণ করেন যে আলোচ্য কণিকাটি হচ্ছে ইলেকট্রনের সমভর সম্পন্ন একটি ধনাত্মক কণিকা।

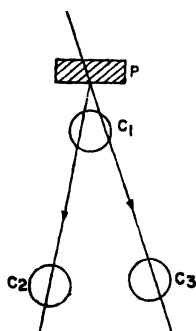
এই অত্যন্ত গুরুত্বপূর্ণ আবিষ্কারের জন্য অ্যান্‌ডারসন ১৯৩৬ সালে নোবেল পুরস্কার প্রাপ্ত হন।

পরে ব্ল্যাকেট এবং অকিয়ালিনি (Blackett and Occhialini) সংখ্যায়ক দ্বারা নিয়ন্ত্রিত মেঘ-কক্ষের সাহায্যে কতকগুলি কণিকার ভ্রমণপথের আলোকচিত্র গ্রহণ করেন, যার থেকে ইলেকট্রন এবং পজিট্রন যুগল-কণিকা উৎপাদনের সুস্পষ্ট প্রমাণ পাওয়া যায়। ইতিপূর্বে (14·5) অনুচ্ছেদে শক্তিশালী ($E > 1·02$ মি-ই-ভো) $\gamma$-রশ্মির প্রভাবে এইরূপ যুগল-কণিকা উৎপাদন (Pair Creation) সম্বন্ধে আলোচনা করা হয়েছে।

### 20·7 : মহাজাগতিক রশ্মিধারা

আয়নন কক্ষের সাহায্যে মহাজাগতিক রশ্মির তীব্রতা পরিমাপ কালে দেখা যায় যে মাঝে মাঝে এই তীব্রতা স্বল্পকালের জন্য হঠাৎ খুব বৃদ্ধি পায়।

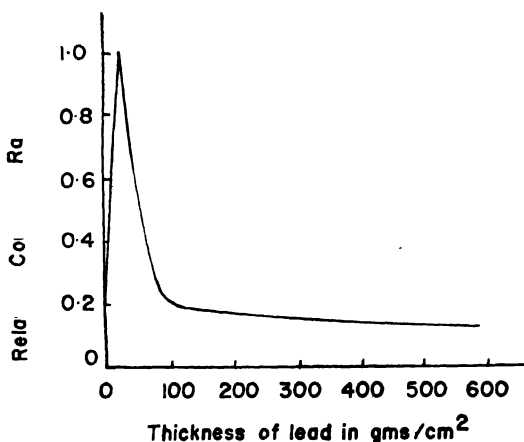
অল্পক্ষণ পরেই আবার স্বাভাবিক অবস্থা ফিরে আসে। এইরূপ সংঘটন সমুদ্রপৃষ্ঠে এবং বায়ুমণ্ডলের বিভিন্ন উচ্চতায় পরিলক্ষিত হয়। প্রাথমিক যুগে এই সংঘটনের নাম দেওয়া হয় 'মহাজাগতিক রশ্মি স্ফোটন' (Cosmic Ray Burst)।

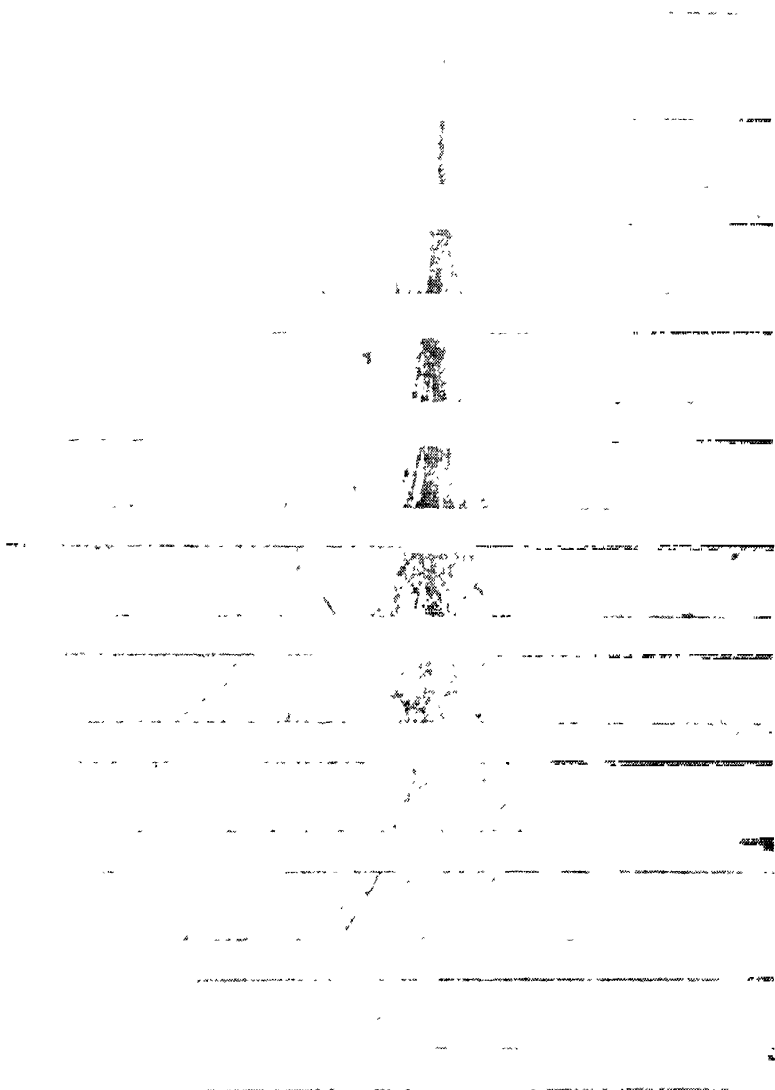
১৯৩১ সালে ইতালীয়ান বিজ্ঞানী রসি (Bruno Rossi) সমাপাতন সংখ্যায়ন ব্যবস্থার (Coincidence Counting Arrangement) সাহায্যে প্রমাণ করেন যে মহাজাগতিক রশ্মির তীব্রতার উপরোক্ত সাময়িক বৃদ্ধির কারণ হচ্ছে বিভিন্ন পদার্থের মধ্যে উক্ত রশ্মি কর্তৃক নূতন কণিকাগুচ্ছের উৎপাদন। রসি প্রথমে কয়েকটি অনুভূমিক তলে স্থাপিত গাইগার-মূলার সংখ্যায়ক সমাপতন ব্যবস্থায় সংযুক্ত করে লক্ষ্য করেন যে মাঝে মাঝে সব সংখ্যায়কগুলি একই সংগে ক্রিয়াশীল হয়ে সমাপতন ঝলক (Coincidence Pulse) উৎপন্ন করে। অনুভূমিক দিক ছাড়া অন্য কোন দিক থেকে আগত কোন একক কণিকার দ্বারা এইভাবে বিন্যস্ত সংখ্যায়কগুলিকে একই সংগে ক্রিয়াশীল করা সম্ভব নয়। অপরপক্ষে যদি সংখ্যায়কগুলির উপরে অবস্থিত কোন স্থানে একই সংগে অনেকগুলি কণিকা উৎপন্ন হয় তাহলে এদের মধ্যে

চিত্র 20·10

মহাজাগতিক রশ্মিধারার আবিষ্কার। $C_1$, $C_2$, $C_3$ হচ্ছে উল্লম্ব সমতলে অবস্থিত এবং সমাপতন ব্যবস্থায় সংযুক্ত তিনটি গাইগার-মূলার সংখ্যায়ক। P হচ্ছে একটি সীসার প্লেট।

কতকগুলি কণিকা বিভিন্ন সংখ্যায়ককে সমকালে ক্রিয়াশীল করতে পারে। এরপর রসি (20·10) চিত্রে প্রদর্শিত ব্যবস্থার সাহায্যে তিনটি সংখ্যায়ককে ত্রিভূজাকারে বিন্যস্ত করে সমাপতনের হার নির্ণয় করেন। সংখ্যায়কগুলির উপরে একটি

সীসার প্লেট রাখা হয়। স্পষ্টতঃ কোন একক কণিকার দ্বারা তিনটি সংখ্যায়ককে একই সময়ে সক্রিয় করা সম্ভব নয়। কিন্তু যদি কোন কারণে সীসার প্লেটের মধ্যে দুই বা ততোধিক কণিকা একই সংগে উৎপন্ন হয়, তাহলে এদের মধ্যে দুটি কণিকার দ্বারা তিনটি সংখ্যায়কই একযোগে সক্রিয় হতে পারে ( 20·10 চিত্র দ্রষ্টব্য )।

সীসার প্লেটের বেধ পরিবর্তন করে রসি সমাপতন হারের (Coincidence Rate) পরিবর্তন নির্ণয় করেন। দেখা যায় যে প্লেটের বেধ বৃদ্ধি করলে এই হার প্রথমে বৃদ্ধি পায় এবং পরে হ্রাস পায়। বেধ প্রায় 2 সেমি হলে এই হার উচ্চতম হয়। উচ্চতর বেধে সমাপতন হার কমে গিয়ে প্রায় ধ্রুবক হয়ে যায়। (20·11) চিত্রে প্রদর্শিত সমাপতন হারের এই পরিবর্তনকে বলা হয় 'রসি সংক্রমণ লেখচিত্র' (Rossi Transition Curve)।

চিত্র 20·11
রসি সংক্রমণ লেখচিত্র।

উপরোক্ত পরীক্ষাগুলি থেকে রসি সিদ্ধান্ত করেন যে সীসার প্লেটের মধ্যে প্রবেশ করে মহাজাগতিক রশ্মি একই সংগে অনেকগুলি নূতন গৌণ (Secondary) কণিকা উৎপন্ন করে। প্লেটের বেধ বৃদ্ধির সংগে এইরূপ গৌণ কণিকাসমূহ উৎপাদনের সম্ভাব্যতা (Probability) বৃদ্ধি পায়। উচ্চতর বেধে এদের মধ্যে অনেকগুলি কণিকা প্লেটের মধ্যে শোষিত হয়ে যায়, যার ফলে সমাপতন হারের উপরোক্ত প্রকার পরিবর্তন ঘটে থাকে। এই

চিত্র 20·12

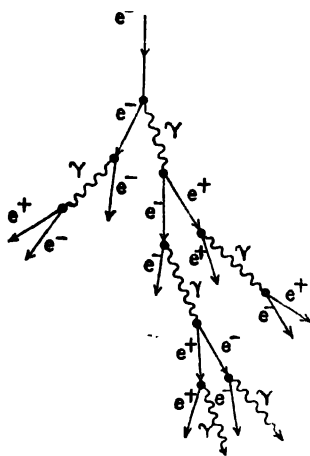
মহাজাগতিক রশ্মিধারার আলোকচিত্র।

সংঘটনকে মহাজাগতিক রশ্মিধারা (Cosmic Ray Shower) আখ্যা দেওয়া হয়।

১৯৩৩ সালে ব্ল্যাকেট সংখ্যায়ক দ্বারা নিয়ন্ত্রিত মেঘকক্ষের সাহায্যে আলোকচিত্র গ্রহণ করে সীসার প্লেটের মধ্যে এইরূপ রশ্মিধারা উৎপাদনের প্রত্যক্ষ প্রমাণ প্রাপ্ত হন। (20·12) চিত্রে এইরূপ একটি মহাজাগতিক রশ্মি-ধারার আলোকচিত্র প্রদর্শিত হয়েছে। মেঘ-কক্ষ পরীক্ষা থেকে প্রমাণিত হয় যে মহাজাগতিক রশ্মিধারার মধ্যে ধনাত্মক এবং ঋণাত্মক দুই প্রকার কণিকাই বর্তমান থাকে। এই সব কণিকা কর্তৃক উৎপন্ন আয়নন হার থেকে প্রতীয়মান হয় যে কণিকাগুলি প্রধানতঃ ইলেকট্রন এবং পজিট্রন। সীসার প্লেটের বেধ বৃদ্ধির সংগে উৎপন্ন কণিকার সংখ্যা বৃদ্ধি পায়। (20·12) চিত্রে মেঘ-কক্ষের মধ্যে পরপর স্থাপিত কয়েকটি প্লেটের মধ্যে ধারা মধ্যস্থ কণিকাগুলির সংখ্যার ক্রমবর্ধন লক্ষ্য করলে এই তথ্যের সত্যতা প্রতীয়মান হয়।

১৯৩৭ সালে ভাবা‡ এবং হাইট্‌লার (H. J. Bhabha and W. Heitler) মহাজাগতিক রশ্মিধারার উৎপাদন সম্বন্ধে একটি তত্ত্ব উদ্‌ভাবিত করেন। দুইজন আমেরিকান বিজ্ঞানী কার্লসন ও ওপেনহাইমার (J. F. Carlson and J. R. Oppenheimer) স্বতন্ত্রভাবে এ সম্বন্ধে আর একটি তত্ত্ব প্রকাশিত করেন। দুটি তত্ত্ব থেকেই মোটামুটি একই ধরনের সিদ্ধান্ত পাওয়া যায়। ভাবা-হাইট্‌লার তত্ত্ব অনুযায়ী মহাজাগতিক রশ্মিধারা সৃষ্টির মূলে আছে দুই প্রকার প্রক্রিয়া—ইলেকট্রন-পজিট্রন যুগল উৎপাদন এবং ব্রেমস্‌স্ট্রালুং (Brehmsstrahlung) পদ্ধতিতে তড়িৎচুম্বকীয় বিকিরণ নিঃসরণ।

(14·5) অনুচ্ছেদে দেখা গেছে যে যখন উচ্চশক্তি তড়িৎচুম্বকীয় বিকিরণ ( $E \geqslant 1{\cdot}02$ মি-ই-ভো ) কোন পদার্থের মধ্যে দিয়ে পরিভ্রমণ করে তখন এই বিকিরণ প্রধানতঃ ইলেকট্রন-পজিট্রন যুগল উৎপাদন (Pair Creation) দ্বারা শক্তিক্ষয় করে। যুগল উৎপাদন ঘটে সাধারণতঃ পদার্থের অভ্যন্তরে বর্তমান পরমাণুসমূহের কেন্দ্রকীয় তড়িৎক্ষেত্রের মধ্যে। আপতিত ফোটনের শক্তি সৃষ্ট কণিকা দুটির ( ইলেকট্রন এবং পজিট্রনের ) মধ্যে সমভাবে

বণ্টিত হয়। এখন যদি মহাজাগতিক রশ্মি মধ্যস্থ একটি উচ্চশক্তি ইলেকট্রন কোন পদার্থের ( যথা বায়ুমণ্ডলীয় গ্যাসের ) মধ্যে পরিভ্রমণ করে, তাহলে পদার্থের অণু বা পরমাণুর সংগে সংঘাতের দ্বারা কণিকাটির গতি মন্দিত (Decelerated) হতে পারে, যার ফলে উচ্চশক্তি তড়িতচুম্বকীয় বিকিরণ নিঃসৃত হয়। এই পদ্ধতিকে ব্রেমস্ষ্ট্রালুং আখ্যা দেওয়া হয়। এই উচ্চশক্তি তড়িৎচুম্বকীয় বিকিরণ পরক্ষণেই কেন্দ্রকীয় তড়িৎক্ষেত্রের মধ্যে ইলেকট্রন-পজিট্রন যুগল উৎপাদন করে। এইভাবে সৃষ্ট ইলেকট্রন এবং পজিট্রনের গতি আবার পদার্থের অণু বা পরমাণুগুলির সংগে সংঘাতের দ্বারা মন্দিত হয়, যার ফলে নূতন করে ব্রেমস্ষ্ট্রালুং বিকিরণ নিঃসৃত হয়। এই প্রক্রিয়াগুলির বারংবার পুনরাবৃত্তির ফলে ফোটন, ইলেকট্রন এবং পজিট্রনের সংখ্যা ক্রমশঃ বৃদ্ধি পেতে থাকে। (20·13) চিত্রে উপরে বর্ণিত উপায়ে মহাজাগতিক রশ্মিধারা (Cosmic

চিত্র 20·13

মহাজাগতিক রশ্মিধারা উৎপত্তির ব্যাখ্যা। একটি উচ্চশক্তি ইলেকট্রন (e) ব্রেমস্ট্রালুং পদ্ধতিতে $\gamma$-রশ্মি উৎপন্ন করে। এই $\gamma$-রশ্মি ইলেকট্রন-পজিট্রন ($e^-$, $e^+$) যুগল উৎপাদন করে। এই দুই প্রকার প্রক্রিয়ার বারংবার পুনরাবৃত্তির ফলে রশ্মিধারার সৃষ্টি হয়।

Ray Shower) সৃষ্টির নিদর্শন দেখান হয়েছে। উপরোক্ত পদ্ধতিতে রশ্মিধারা মধ্যস্থ কণিকার সংখ্যা বৃদ্ধি পেতে পেতে অবশেষে এমন অবস্থার সৃষ্টি হয় যে সৃষ্ট কণিকাগুলি এবং ফোটনের শক্তি খুব কমে যায়। এর পরে

কণিকা-যুগল উৎপন্ন হওয়া আর সম্ভব হয় না। সুতরাং সৃষ্ট কণিকাগুলির সংখ্যা একটা উচ্চতম সীমা পর্যন্ত বৃদ্ধি পায়। যে পদার্থের মধ্যে রশ্মিধারা উৎপন্ন হয়, তার বেধ খুব বেশী হলে উৎপন্ন কণিকাগুলির মধ্যে কিছু কিছু আবার পদার্থের মধ্যে শোষিত হতে থাকে।

এখানে উল্লেখযোগ্য যে মহাজাগতিক রশ্মির মধ্যে বর্তমান স্বল্পভেদী অংশ (Soft Radiation) প্রধানতঃ বায়ুমণ্ডলের মধ্যে রশ্মিধারা উৎপাদনের ফলে সৃষ্ট হয়। এই স্বল্পভেদী অংশের মধ্যে বেশীর ভাগ কণিকাই হচ্ছে ইলেকট্রন, পজিট্রন বা ফোটন ( 20·2 অনুচ্ছেদ দ্রষ্টব্য )। এগুলি 10 সেমি অপেক্ষা কম পুরু সীসার প্লেট দ্বারা সম্পূর্ণ শোষিত হয়ে যায়।

## 20·8 : মহাজাগতিক রশ্মির উচ্চভেদী অংশ ; $\mu$ মেসন

(20·2) অনুচ্ছেদে দেখা গেছে যে স্বল্পভেদী অংশ ছাড়াও মহাজাগতিক রশ্মির মধ্যে আর একটি খুব উচ্চভেদী অংশ থাকে যা এক মিটার অথবা আরও বেশী বেধ সম্পন্ন সীসার ভিতর দিয়ে পার হয়ে যেতে পারে ( 20·2 চিত্র দ্রষ্টব্য )। সাধারণতঃ দুটি বা তিনটি গাইগার-মূলার সংখ্যায়ককে সমাপতন ব্যবস্থায় সংযুক্ত করে (20·2) চিত্রে প্রদর্শিত মহাজাগতিক রশ্মি শোষণের লেখচিত্র নিরূপণ করা হয়। সংখ্যায়কগুলিকে একটির উপরে আর একটি এইভাবে বিন্যস্ত করা হয় এবং এদের অন্তর্বর্তী স্থানে সীসার প্লেট রাখা হয়। সীসার প্লেটের সংখ্যা ক্রমশঃ বৃদ্ধি করে সমাপতন হার পরিমাপ করা হয়। এই ভাবে সীসার প্লেটের বেধের সংগে উল্লম্ব দিক থেকে আগত মহাজাগতিক রশ্মির তীব্রতার পরিবর্তন পরিমাপ করা যায়। যেহেতু সংখ্যায়কগুলিকে এইভাবে বিন্যস্ত করে মহাজাগতিক রশ্মির আগমন পথ নির্দেশিত করা যায়, সেজন্য এই ব্যবস্থাকে 'সংখ্যায়ক-দূরবীক্ষণ' (Counter Telescope) আখ্যা দেওয়া হয়। সংখ্যায়ক তিনটির সংযোগকারী অক্ষকে বিভিন্ন দিকে নির্দেশিত করে উল্লম্ব দিক ছাড়াও অন্যান্য দিক থেকে আগত মহাজাগতিক রশ্মির তীব্রতা পরিমাপ করা যায়।

মহাজাগতিক রশ্মির উচ্চভেদী অংশের (Penetrating Component) প্রকৃতি সম্বন্ধে অনেক দিন পর্যন্ত কোন নির্দিষ্ট সিদ্ধান্ত করা সম্ভব হয় নি। এই কণিকাগুলি যে ইলেকট্রন, পজিট্রন বা ফোটন নয় তা মোটামুটি স্পষ্টভাবে বোঝা যায়। কারণ কোয়ানটাম তড়িৎ-গতিবিদ্যা (Quantum Electrodynamics) তত্ত্ব অনুযায়ী এই সব কণিকার

শক্তি যত উচ্চই হোক না কেন এরা দশ সেণ্টিমিটার অপেক্ষা কম বেধ সম্পন্ন সীসার প্লেট দ্বারা সম্পূর্ণ শোষিত হবে। মহাজাগতিক রশ্মির স্বল্পভেদী অংশের শোষণ সম্পর্কিত পরীক্ষা থেকে এই সিদ্ধান্তের সত্যতা সমর্থিত হয়।

উচ্চভেদী মহাজাগতিক রশ্মির প্রকৃতি নির্ণয়ের জন্য পজিট্রন আবিষ্কর্তা আমেরিকান বিজ্ঞানী অ্যানডারসন ও তাঁর সহযোগী নেডারমেয়ার (Neddermeyer) সংখ্যায়ক-নিয়ন্ত্রিত মেঘ-কক্ষ ব্যবহার করে কতকগুলি গুরুত্বপূর্ণ পরীক্ষা অনুষ্ঠিত করেন। এই সব পরীক্ষা থেকে তাঁরা অনুমান করেন যে এই রশ্মি প্রধানতঃ ইলেকট্রন অপেক্ষা প্রায় দুই শত গুণ ভারী এক প্রকার আহিত কণিকার দ্বারা গঠিত। তাঁরা একটি মেঘ-কক্ষের মধ্যে সীসার প্লেট স্থাপিত করে বহু সংখ্যক আলোকচিত্র গ্রহণ করেন। এই সব চিত্রের মধ্যে দুই শ্রেণীর কণিকার ভ্রমণপথ পরিলক্ষিত হয়। এক শ্রেণীর কণিকা সীসার প্লেটের মধ্যে রশ্মিধারা (Shower) উৎপন্ন করে, অন্যগুলি কোন রশ্মিধারা উৎপন্ন করে না। প্রথম শ্রেণীর কণিকাগুলি সহজেই সীসার মধ্যে শোষিত হয়। এগুলি মহাজাগতিক রশ্মির স্বল্পভেদী অংশের অন্তর্গত এবং প্রধানতঃ ইলেকট্রন বা পজিট্রন দ্বারা গঠিত। অন্য শ্রেণীর কণিকাগুলি খুব উচ্চভেদী হয়।

আমরা জানি যে উচ্চশক্তি আহিত কণিকাসমূহ পদার্থের মধ্যে দ্বিবিধ পদ্ধতিতে শক্তিক্ষয় করে, সংঘাতের দ্বারা এবং বিকিরণ নিঃসরণের দ্বারা। সংঘাতের দ্বারা একটি আহিত কণিকা পদার্থের পরমাণুগুলিকে আয়নিত বা উত্তেজিত করে শক্তিক্ষয় করে। অপেক্ষাকৃত নিম্নতর শক্তিতে এই শক্তিক্ষয়ের হার খুব উচ্চ হয়। একই আধান সম্পন্ন কণিকার ক্ষেত্রে এইরূপ শক্তিক্ষয়ের হার কণিকার ভরের সমানুপাতিক হয়। অর্থাৎ গুরুভার কণিকার ক্ষেত্রে শক্তিক্ষয় বেশী হয়; সেজন্য ভারী কণিকার আয়নন ক্ষমতা অনেক বেশী হয় এবং মেঘ-কক্ষের মধ্যে এইরূপ কণিকার ভ্রমণপথ অপেক্ষাকৃত স্থূলতর হয়। উদাহরণস্বরূপ $10^5$ ই-ভো শক্তি সম্পন্ন প্রোটনের ভ্রমণপথ (Track) অনুরূপ শক্তি সম্পন্ন ইলেকট্রনের ভ্রমণপথ অপেক্ষা প্রায় দুই সহস্র গুণ স্থূলতর হয়। আবার ইলেকট্রন অপেক্ষা দুই শত গুণ বেশী ভর সম্পন্ন ($m=200\ m_e$) সমান আধানবাহী কণিকার ভ্রমণপথ ইলেকট্রনের তুলনায় প্রায় দুই শত গুণ স্থূলতর হয়, কিন্তু প্রোটনের তুলনায় ক্ষীণতর হয়।

উচ্চতর শক্তিতে সংঘাত জনিত শক্তিক্ষয়ের হার হ্রাস পায় এবং নির্দিষ্ট ন্যূনতম শক্তির উপরে এই হার অতি ধীরে বৃদ্ধি পায়। এইরূপ বৃদ্ধি ঘটে ইলেকট্রনের ক্ষেত্রে এক মি-ই-ভো অপেক্ষা উচ্চতর শক্তিতে, $200m_e$ ভর সম্পন্ন কণিকার ক্ষেত্রে 200 মি-ই-ভো অপেক্ষা উচ্চতর শক্তিতে এবং প্রোটনের ক্ষেত্রে প্রায় 2000 মি-ই-ভো অপেক্ষা উচ্চতর শক্তিতে। সমান আধান সম্পন্ন কণিকাসমূহের ক্ষেত্রে এই অঞ্চলে শক্তিক্ষয়ের হার প্রায় সমান হয়। অর্থাৎ এই সব বিভিন্ন ভর সম্পন্ন খুব উচ্চশক্তি কণিকাগুলির ভ্রমণপথের স্থূলতার বিশেষ কোন তারতম্য হয় না। সুতরাং মেঘ-কক্ষের মধ্যে এই সব কণিকার ভ্রমণপথ (Track) পর্যবেক্ষণ করে এদের স্বরূপ নির্ণয় করা সম্ভব নয়।

উচ্চতর শক্তিতে আহিত কণিকাসমূহ ব্রেমস্স্ট্রালুং পদ্ধতিতে বিকিরণ নিঃসরণ করেও শক্তিক্ষয় করে। ইলেকট্রনের ক্ষেত্রে এইরূপ বিকিরণ জনিত ক্ষয়ের হার $10^6$ ই-ভো অপেক্ষা উচ্চতর শক্তিতে খুব প্রকট হয়ে ওঠে। ফলে এই সব উচ্চশক্তি ইলেকট্রন প্রধানতঃ বিকিরণ নিঃসরণ করে শক্তিক্ষয় করে। সেইজন্যই ইলেকট্রন বা পজিট্রনের শক্তি যত উচ্চই হোক না কেন তারা কয়েক সেমি পুরু সীসার দ্বারা সম্পূর্ণ শোষিত হয়। ইলেকট্রনের সমান আধানবাহী $200m_e$ ভর সম্পন্ন কণিকা অথবা প্রোটনের ক্ষেত্রে বিকিরণ জনিত শক্তিক্ষয় প্রায় উপেক্ষণীয় ধরা যেতে পারে। কারণ উচ্চতর ভরের জন্য সমান বলের প্রভাবে এদের ত্বরণ ( বা মন্দন ) ইলেকট্রন অপেক্ষা অনেক কম হয়। অর্থাৎ $10^6$ ই-ভো অপেক্ষা উচ্চতর শক্তিতে কেবল ইলেকট্রনই বিকিরণ দ্বারা শক্তিক্ষয় করে, ভারী কণিকাগুলি করে না। সুতরাং এই সব ভারী কণিকা পদার্থের মধ্যে কেবল সংঘাত দ্বারা শক্তিক্ষয় করে, উচ্চতর শক্তিতে যার মান খুব সামান্য। ফলে পদার্থের মধ্যে এইসব ভারী উচ্চশক্তি কণিকার, বিশেষতঃ $200m_e$ ভর সম্পন্ন কণিকার ভেদ্যতা ইলেকট্রন অপেক্ষা অনেক বেশী হবে বলে আশা করা যায়।

উপরের আলোচনা থেকে বোঝা যায় যে একটি $200m_e$ ভর সম্পন্ন ইলেকট্রনীয় আধানবাহী কণিকার শক্তি যদি $10^8$ বা $10^9$ ই-ভো মাত্রার হয়, তাহলে এর ভেদ্যতা খুব বেশী হয়, এবং এর ভ্রমণপথের স্থূলতা ইলেকট্রনের ভ্রমণপথের অনুরূপ হয়। অপরপক্ষে অনুরূপ শক্তি সম্পন্ন প্রোটনের ভ্রমণপথ ইলেকট্রনের তুলনায় অনেক বেশী স্থূলতর হয়, এবং এর ভেদ্যতা

$200m_e$ ভর সম্পন্ন সমান আধানবাহী কণিকার তুলনায় অপেক্ষাকৃত কম হয়, যদিও ইলেকট্রনের তুলনায় বেশী হয়।

মেঘ-কক্ষের সাহায্যে প্রাপ্ত আলোকচিত্রের মধ্যে অ্যান্ডারসন ও নেডারমেয়ার এইরূপ একটি উচ্চভেদী কণিকার ভ্রমণপথের নিদর্শন পান। তাঁদের পরীক্ষায় উল্লম্ব সমতলে অবস্থিত মেঘ-কক্ষটি চৌম্বক ক্ষেত্রের মধ্যে স্থাপিত ছিল। মেঘ-কক্ষের মধ্যে অবস্থিত 3·5 মিমি পুরু সীসার প্লেটের ভিতর দিয়ে পার হয়ে আসা একটি উচ্চভেদী কণিকার ভ্রমণপথের আলোকচিত্র বিশ্লেষণ করে তাঁরা দেখেন যে প্লেট থেকে নির্গত এই উচ্চভেদী কণিকাটির পথসীমা (Range) ছিল প্রায় 4 সেমি এবং এর ভ্রমণপথের বক্রতা ব্যাসার্ধ (Radius of Curvature) ছিল প্রায় 7 সেমি। চৌম্বক ক্ষেত্রের মান থেকে কণিকাটির $Hr$ এবং তার থেকে এর ভরবেগ নির্ণয় করা হয়। এই পরিমাপ থেকে বোঝা যায় যে কণিকাটি ইলেকট্রন অপেক্ষা ভারী, কারণ সীসার প্লেটের মধ্যে এর শক্তিক্ষয় পরিমিত ভরবেগ সম্পন্ন ইলেকট্রনের তুলনায় অনেক কম হয়। অ্যান্ডারসন ও নেডারমেয়ার প্রমাণ করেন যে কণিকাটি প্রোটনও হতে পারে না। কারণ কণিকাটিকে প্রোটন ধরে নিয়ে পরিমিত পথসীমা ( 4 সেমি ) থেকে এর শক্তি নির্ণয় করা যায়। শক্তি থেকে এর ভরবেগ এবং তার থেকে এর $Hr$ পাওয়া যায়। দেখা যায় যে কণিকাটি প্রোটন হলে প্রযুক্ত চৌম্বক ক্ষেত্রে (7900 গাওস ) এর ভ্রমণপথের বক্রতা ব্যাসার্ধ হওয়া উচিত প্রায় 20 সেমি। পরিমিত বক্রতা ব্যাসার্ধ এর তুলনায় অনেক কম হওয়ার অর্থ হচ্ছে যে কণিকাটির ভর প্রোটনের তুলনায় কম।

সুতরাং অ্যান্ডারসন এবং নেডারমেয়ার সিদ্ধান্ত করেন যে কণিকাটি হচ্ছে ইলেকট্রন অপেক্ষা ভারী কিন্তু প্রোটন অপেক্ষা হাল্‌কা কোন আহিত কণিকা। কণিকাটির আধান ইলেকট্রনীয় আধানের সমান ধরে নিয়ে প্রাথমিক পরিমাপ থেকে এর ভর পাওয়া যায় প্রায় দুইশত ইলেকট্রনীয় ভরের সমান। অ্যান্ডারসন ও নেডারমেয়ার কর্তৃক আবিষ্কৃত এই জাতীয় কণিকাগুলির মধ্যে ধনাত্মক এবং ঋণাত্মক, দুই প্রকার আধানবাহী কণিকাই পরিলক্ষিত হয়। তাঁরা এই কণিকাগুলির নাম দেন ভারী ইলেকট্রন (Heavy Electrons)। বর্তমানে এগুলি $\mu$-মেসন ($\mu$-Meson) নামে পরিচিত।

অ্যান্ডারসন ও নেডারমেয়ারের আবিষ্কারের অল্প দিনের মধ্যেই ষ্ট্রীট ও ষ্টিভেন্‌সন (Street and Stevenson) এইরূপ কণিকার অস্তিত্ব

সংশয়াতীত ভাবে প্রমাণ করেন। তাঁদের পরীক্ষায় একটি সংখ্যায়ক নিয়ন্ত্রিত মেঘ-কক্ষের উপরে 10 সেমি পুরু সীসার প্লেট স্থাপিত করা হয়, যাতে স্বল্পভেদী অংশ সম্পূর্ণ শোষিত হয়ে যায়। মেঘ-কক্ষের মধ্যে দ্বিতীয় আর একটি সীসার প্লেট রাখা হয়। বিষমাপতন (Anti Coincidence) ব্যবস্থার সাহায্যে কেবল সেই সব উচ্চভেদী কণিকার ভ্রমণপথের আলোকচিত্র গ্রহণ করা হয় যেগুলি দ্বিতীয় সীসার প্লেট ভেদ করে অল্প দূর মাত্র অগ্রসর হতে পারে ; মেঘ-কক্ষের নীচে অবস্থিত সংখ্যায়কগুলি পর্যন্ত উপস্থিত হতে পারে না। বিষমাপতন ব্যবস্থার দ্বারা এই জাতীয় কণিকাগুলিকে বেছে নেওয়া সম্ভব হয়। স্পষ্টতঃ দ্বিতীয় সীসার প্লেট থেকে নির্গত হবার পর কণিকাটির খুব অল্প পরিমাণ শক্তিই অবশিষ্ট থাকে, যার ফলে মেঘ-কক্ষের মধ্যে এর ভ্রমণপথ বেশ স্থূল হয়। আমরা পূর্বেই দেখেছি যে এইরূপ নিম্নশক্তি কণিকার ক্ষেত্রে ভ্রমণপথের স্থূলতা থেকে ভর নিরূপণ সম্ভব। স্ট্রীট ও ষ্টিভেন্সনের পরিমাপ অনুসারে কণিকাটির ভর পাওয়া যায় ইলেকট্রনীয় ভরের প্রায় 130 গুণ বেশী। তাঁরা ধনাত্মক এবং ঋণাত্মক উভয় প্রকার কণিকার নিদর্শন পান।

পরবর্তী যুগে আরও সঠিকভাবে $\mu$-মেসনের ভর নির্ণয় করা হয়েছে। বর্তমানে এই ভরের সার্বিক ভাবে গৃহীত মান হচ্ছে

$$m_\mu = (207 \pm 1) m_e$$

## 20·9 : $\mu$-মেসনের বিঘটন

পরীক্ষার দ্বারা দেখা যায় যে $\mu$-মেসন স্থায়ী কণিকা নয়। ইলেকট্রন ( বা পজিট্রন ) নিঃসৃত করে এগুলি বিঘটিত হয়ে যায়। $\mu$-মেসন আবিষ্কারের অল্পদিন পরেই এদের গড় জীবনকাল পরিমাপ করা হয়। এই গড় জীবনকাল মাত্র কয়েক মাইক্রো-সেকেণ্ড ( $10^{-6}$ সেকেণ্ড ) পাওয়া যায়।

রসি (Rossi) এবং তাঁর সহযোগীগণ ১৯৪০ সালে সর্বপ্রথম $\mu$-মেসনের গড় জীবনকাল (Mean Life) পরিমাপের জন্য একটি পরীক্ষা পদ্ধতি উদ্ভাবিত করেন। এই পদ্ধতিতে একটি সংখ্যায়ক দূরবীক্ষণের (Counter Telescope) সাহায্যে সমুদ্রপৃষ্ঠে এবং সমুদ্রপৃষ্ঠ থেকে বিভিন্ন উচ্চতায় মহাজাগতিক রশ্মির উচ্চভেদী অংশের উল্লম্ব তীব্রতা (Vertical Intensity) পরিমাপ করা হয়। যদি $\mu$-মেসনগুলি তেজস্ক্রিয় না হয়, তাহলেও বাতাসের

মধ্যে শোষণের ফলে বায়ুমণ্ডলের নিম্নতর স্তরে কণিকাগুলির আপতন হার উচ্চতর স্তর অপেক্ষা কম হওয়া উচিত। উদাহরণস্বরূপ যদি এই পদ্ধতিতে কলিকাতায় এবং দার্জিলিং শহরে $\mu$-মেসনের আপতন হার পরিমাপ করা হয়, তাহলে দার্জিলিংয়ে আপতন হার উচ্চতর হবে। এখন যদি দার্জিলিং ও কলিকাতার মধ্যে প্রতি একক ক্ষেত্রফলে বর্তমান বায়ুস্তরের সমপরিমাণ শোষণ ক্ষমতা সম্পন্ন একটি কঠিন পদার্থের ( যথা কয়েক সেণ্টিমিটার পুরু লোহার ) শোষক প্লেট দার্জিলিংয়ে পরিমাপের সময় সংখ্যায়ক দূরবীক্ষণের উপরে স্থাপিত করা যায়, তাহলে উভয় স্থানেই $\mu$-মেসনের আপতন হার সমান হওয়া উচিত। কারণ দার্জিলিং থেকে কলিকাতা পর্যন্ত নেমে আসার পথে কণিকাগুচ্ছের যে অংশ বাতাসে শোষিত হয়, ঠিক সমপরিমাণ অংশ দার্জিলিংয়ে পরিমাপ কালে লোহার প্লেটের মধ্যে শোষিত হয়। প্রকৃত ক্ষেত্রে কিন্তু দেখা যায় যে উপরোক্ত ব্যবস্থা অবলম্বন করা সত্ত্বেও বায়ুমণ্ডলের উচ্চতর স্তরে ( দার্জিলিংয়ে ) কণিকাগুচ্ছের আপতন হার নিম্নতর স্তর অপেক্ষা কিছু বেশী হয়।

এর কারণ হচ্ছে $\mu$-মেসনের তেজস্ক্রিয় বিঘটন। দার্জিলিং থেকে কলিকাতা পর্যন্ত নেমে আসতে $\mu$-মেসনগুলিকে প্রায় 2330 মিটার ( প্রায় 7000 ফুট ) অতিরিক্ত পথ পরিভ্রমণ করতে হয়। এই পথ অতিক্রম করতে $\mu$-মেসনগুলির যে সময় লাগে তা এদের গড় জীবনকালের তুলনায় বেশী। ফলে এই পথের মধ্যে এদের বেশ কিছু অংশ বিঘটিত হয়। উভয়স্থানে $\mu$-মেসনের আপতন হার পরিমাপ করে এদের গড় জীবনকাল পাওয়া যায়। রসি ও তাঁর সহযোগীগণ ছাড়াও আরও অনেকে উপরোক্ত পদ্ধতিতে অনুরূপ পরিমাপ করেছেন। এই পদ্ধতিতে পরিমিত গড় জীবনকালের মান পাওয়া যায় প্রায় $2{\cdot}5 \times 10^{-6}$ সেকেণ্ড।

এখানে উল্লেখযোগ্য যে বিঘটনকালে বিভিন্ন $\mu$-মেসন বিভিন্ন বেগে ভ্রমণ করে। এই বেগ সাধারণতঃ খুব উচ্চ হয় এবং আলোকের বেগের সংগে তুলনীয় হয়। আপেক্ষিকতাবাদ জনিত সময়ের দীর্ঘসূত্রতা (Time Dilatation) সূত্র থেকে জানা যায় যে উচ্চ বেগে ভ্রাম্যমাণ পরীক্ষকের দ্বারা পরিমিত সময়ের মাপ দীর্ঘতর হয় ( 8·8 অনুচ্ছেদ দ্রষ্টব্য )। সুতরাং গবেষণাগারে পরীক্ষারত নিরীক্ষকের সাপেক্ষে উচ্চ বেগে ভ্রাম্যমাণ $\mu$-মেসনের বিঘটনের গড় জীবনকাল এদের প্রকৃত গড় জীবনকাল অপেক্ষা দীর্ঘতর বলে বোধ হবে। এই সব বিভিন্ন পরিমিত গড় জীবনকাল থেকে (8·19)

সমীকরণের সাহায্যে $\mu$-মেসনের প্রকৃত গড় জীবনকাল নিরূপণ করা যায়, যার মান বিঘটনশীল $\mu$-মেসনের সাপেক্ষে স্থির নিরীক্ষক কর্তৃক পরিমিত গড় জীবনকালের সমান হয়। এই মানই উপরে উল্লিখিত হয়েছে।

পরবর্তী যুগে এই গড় জীবনকাল পরিমাপের জন্য আরও উন্নততর পরীক্ষা পদ্ধতি উদ্‌ভাবিত হয়। বর্তমানে $\mu$-মেসনের গড় জীবনকালের সার্বিকভাবে গৃহীত মান হচ্ছে

$$\tau_\mu = (2\cdot200 \pm 0\cdot0015) \times 10^{-6} \text{ সেকেণ্ড}$$

$\mu$-মেসনের বিঘটনের ফলে একটি ইলেকট্রন ( বা পজ়িট্রন ) সৃষ্ট হয়। সংগে সংগে দুটি নিউট্রিনো নিঃসৃত হয়ঃ

$$\mu^{\pm} \longrightarrow e^{\pm} + 2\nu$$

নিঃসৃত নিউট্রিনোগুলিকে অবশ্য দেখা যায় না।

মেঘ-কক্ষ পরীক্ষার দ্বারা এবং কেন্দ্রকীয় অবদ্রব প্লেট ব্যবহার করে $\mu$-মেসনের বিঘটনের প্রকৃতি নিরূপণ করা হয়েছে। (20·14) চিত্রে $\mu$-মেসন বিঘটনের একটি কেন্দ্রকীয় অবদ্রব ফোটোগ্রাফ প্রদর্শিত হয়েছে। চিত্রে $\mu$-মেসনের ভ্রমণপথের শেষ প্রান্ত থেকে একটি ইলেকট্রন নিঃসৃত হতে দেখা যায়। পরীক্ষার দ্বারা দেখা যায় যে নিঃসৃত ইলেকট্রনগুলির শক্তি শূন্য থেকে প্রায় 52 মি-ই-ভো পর্যন্ত সীমার মধ্যে বণ্টিত হয়। বিঘটন কালে যদি একটি মাত্র নিউট্রিনো নিঃসৃত হয় তাহলে শক্তি ও ভরবেগ সংরক্ষণ সূত্রানুযায়ী ইলেকট্রন এবং নিউট্রিনো, প্রত্যেকটি কণিকার নির্দিষ্ট পরিমাণ শক্তি থাকা উচিত। যেহেতু তা হয় না অতএব অনুমান করা যায় যে বিঘটন কালে একাধিক নিউট্রিনো নিঃসৃত হয়। যেহেতু $\mu$-মেসনের ঘূর্ণন কৌণিক ভরবেগ (Spin Angular Momentum) হচ্ছে $\frac{1}{2}\frac{h}{2\pi}$ এবং যেহেতু ইলেকট্রনের এবং নিউট্রিনোর ঘূর্ণন কৌণিক ভরবেগও $\frac{1}{2}\frac{h}{2\pi}$ হয়, অতএব অনুমান করা প্রয়োজন যে $\mu$-মেসনের বিঘটন কালে জোড় সংখ্যক নিউট্রিনো নিঃসৃত হয়। সাধারণতঃ ধরে নেওয়া হয় যে দুটি নিউট্রিনো নিঃসৃত হয়। বিঘটন কালে নিঃসৃত ইলেকট্রনগুলির শক্তি বণ্টন বিবেচনা করলে তাত্ত্বিক বিচারে প্রতীয়মান হয় যে এদের মধ্যে একটি হচ্ছে $\beta$-বিঘটনের সময় নিঃসৃত নিউট্রিনোর সমরূপী ( $\beta$-নিউট্রিনো ), অপরটির প্রকৃতি ভিন্ন। এটিকে বলা হয় $\mu$-নিউট্রিনো।

## 20·10 : $\pi$-মেসন

মেসন আবিষ্কারের দুই বছর পূর্বে প্রখ্যাত জাপানী বিজ্ঞানী ইউকাওয়া (H. Yukawa) কেন্দ্রকের অভ্যন্তরে নিউক্লীয়নগুলির পারস্পারিক আকর্ষণ ব্যাখ্যা করার জন্য এইরূপ একটি কণিকার অস্তিত্ব কল্পনা করেন। (16·11) অনুচ্ছেদে এ সম্বন্ধে সংক্ষিপ্ত আলোচনা করা হয়েছে। ইউকাওয়ার মতানুসারে নিউক্লীয়নগুলির মধ্যেকার অতি প্রখর এবং স্বল্প দূরত্বসীমা (Range) পর্যন্ত ক্রিয়াশীল আকর্ষণী বলের উদ্ভব হয় এদের মধ্যে ইলেকট্রন অপেক্ষা প্রায় দুইশত গুণ ভারী একটি কণিকার আদান-প্রদানের (Exchange) ফলে। বিভিন্ন তেজস্ক্রিয় কেন্দ্রকের $\beta$-বিঘটনশীলতা ব্যাখ্যা করার জন্য ইউকাওয়া অনুমান করেন যে এই কণিকাগুলি অস্থায়ী হবে। তাঁর তত্ত্ব অনুসারে এদের জীবনকাল হওয়া উচিত প্রায় $10^{-৮}$ সেকেণ্ড।

$\mu$-মেসন আবিষ্কারের পরে স্বভাবতঃই অনুমান করা হয় যে এই কণিকাটিই হচ্ছে ইউকাওয়া কল্পিত উপরোক্ত কণিকা। কিন্তু অল্প কিছুদিনের মধ্যেই এই অনুমানের অসংগতি পরিলক্ষিত হয়।

ইউকাওয়ার তত্ত্ব অনুযায়ী দুটি নিউক্লীয়নের মধ্যেকার প্রবল আকর্ষণী বিক্রিয়ার (Interaction) ফলে মেসন সৃষ্ট হয়। সুতরাং আশা করা যেতে পারে যে এইভাবে সৃষ্ট মেসনগুলি নিজেরাও নিউক্লীয়নসমূহের সংগে খুব প্রবলভাবে বিক্রিয়া করবে; অর্থাৎ বিভিন্ন কেন্দ্রকের সংগে এদের বিক্রিয়ার সম্ভাব্যতা (Probability) খুব উচ্চ হবে। প্রকৃতপক্ষে কিন্তু $\mu$-মেসনের ক্ষেত্রে ঠিক এর বিপরীতই ঘটে। $\mu$-মেসনগুলির উচ্চ ভেদ্যতা থেকে প্রতীয়মান হয় যে পদার্থের অভ্যন্তরে কেন্দ্রকসমূহের সংগে এদের বিক্রিয়ার সম্ভাব্যতা খুব কম হয়। আর একটা অসংগতি হচ্ছে এদের গড় জীবনকালের মান। পরিমিত গড় জীবনকাল ( 2·2 মাইক্রো-সেকেণ্ড ) ইউকাওয়া কর্তৃক অনুমিত গড় জীবনকালের প্রায় একশত গুণ বেশী পাওয়া যায়।

এই অসংগতিগুলি বিবেচনা করে মার্শাক (Marshak) নামক আমেরিকান বিজ্ঞানী অনুমান করেন যে ইউকাওয়া কল্পিত মেসন আর $\mu$-মেসন এক জাতীয় কণিকা নয়। ১৯৪৭ সালে ইংলণ্ডে বৃষ্টল বিশ্ববিদ্যালয়ে পাওয়েল (C. F. Powell) এবং সহযোগীবৃন্দ উচ্চ পর্বতের উপরে কয়েক মাস ধরে ফেলে রাখা কিছু কেন্দ্রকীয় অবদ্রব প্লেট (Nuclear Emulsion Plates) বিকসিত করে সেগুলির মধ্যে একটি নূতন কণিকার ভ্রমণপথের নিদর্শন পান।

চিত্র 20·14

কেন্দ্রকীয় অবদ্রব প্লেটে $\mu$ এবং $\pi$ মেসনের ভ্রমণপথ এবং অবক্ষয়ের নিদর্শন।

প্রাথমিক পরিমাপ থেকে তাঁরা সিদ্ধান্ত করেন যে কণিকাটির ভর হচ্ছে প্রায় $300m_e$ ; তাঁরা এর নাম দেন $\pi$-মেসন (Primary বা মুখ্য মেসন )। দেখা যায় এদের মধ্যে কিছু সংখ্যক কণিকা অবদ্রবের পরমাণু কেন্দ্রকগুলির সংগে বিক্রিয়া করে সেগুলিকে বিঘটিত করে। আর কিছু সংখ্যক $\pi$-মেসন নিজেরাই বিঘটিত হয়ে যায় ; এদের ভ্রমণপথের শেষ প্রান্ত থেকে আর একটি কণিকা নিঃসৃত হতে দেখা যায়। (20·14) চিত্রে $\pi$-মেসনের নিদর্শন প্রদর্শিত হয়েছে। মহাজাগতিক রশ্মির মধ্যে $\pi$-মেসনগুলিকে সাধারণতঃ বায়ুমণ্ডলের উচ্চস্তরে সৃষ্ট হতে দেখা যায়। অপরপক্ষে $\mu$-মেসনগুলি প্রধানতঃ সমুদ্রপৃষ্ঠের কাছাকাছি পাওয়া যায়।

$\pi$-মেসন আবিষ্কারের পর প্রতীয়মান হয় যে এই কণিকাগুলিই হচ্ছে ইউকাওয়া কল্পিত কণিকা, যারা নিউক্লীয়নসমূহের মধ্যেকার আকর্ষণী বলের জন্য দায়ী। $\pi$-মেসনগুলি খুব প্রবল ভাবে কেন্দ্রকের সংগে বিক্রিয়া করে, যার ফলে এই সব কেন্দ্রক বিঘটিত হয়। $\pi$-মেসনগুলি তেজস্ক্রিয় হয়। এদের বিঘটনের ফলে একটি $\mu$-মেসন সৃষ্ট হয় এবং একটি নিউট্রিনো নিঃসৃত হয় ঃ

$$\pi^{\pm} \longrightarrow \mu^{\pm} + \nu$$

সৃষ্ট $\mu$-মেসনগুলিকে নির্দিষ্ট শক্তি সহকারে নিঃসৃত হতে দেখা যায় ( প্রায় 4·2 মি-ই-ভো )। এর থেকে প্রতীয়মান হয় যে $\pi^{\pm}$ মেসনের বিঘটন কালে $\mu^{\pm}$ মেসনের সংগে আর একটি মাত্র কণিকা নিঃসৃত হতে পারে। (20·14) চিত্রে $\pi - \mu$ অবক্ষয়ের (Decay) নিদর্শন দেখা যায়।

পরবর্তী যুগে $\pi$-মেসনের ভর এবং গড় জীবনকাল খুব সঠিক ভাবে নির্ণীত হয়। এদের মান হচ্ছে

$$m(\pi^{\pm}) = 273{\cdot}3\ m_e$$

$$\tau(\pi^{\pm}) = 2{\cdot}5 \times 10^{-8} \text{ সেকেণ্ড}$$

ইলেকট্রনীয় আধান সম্পন্ন ধনাত্মক এবং ঋণাত্মক উভয় প্রকার $\pi$-মেসন ছাড়াও আধানহীন (Neutral) $\pi^0$ মেসনও আবিষ্কৃত হয়েছে। $\pi^0$ মেসনের ভর হচ্ছে

$$m(\pi^{\circ}) = 264{\cdot}2\ m_e$$

$\pi^0$ মেসনগুলিও তেজস্ক্রিয় হয়। এদের গড় জীবনকাল হচ্ছে

$$\tau(\pi^{\circ}) \approx 10^{-15} \text{ সেকেণ্ড}$$

$\pi^0$ মেসনের বিঘটনের ফলে দুটি উচ্চশক্তি $\gamma$-রশ্মি উৎপন্ন হয় :

$$\pi^0 \longrightarrow 2\gamma$$

$\pi$-মেসন আবিষ্কারের অব্যবহিত পরেই ১৯৪৮ সালে ক্যালিফর্নিয়া বিশ্ববিদ্যালয়ের 184″ সিংক্রো-সাইক্লোট্রন থেকে প্রাপ্ত 380 মি-ই-ভো শক্তি সম্পন্ন $\alpha$-কণিকার সাহায্যে ল্যাটেস্ এবং গার্ড্নার (Lattes and Gardner) সর্বপ্রথম কৃত্রিম উপায়ে $\pi$-মেসন উৎপন্ন করেন। পরে উচ্চশক্তি প্রোটনের সাহায্যেও $\pi$-মেসন উৎপন্ন করা হয়। তাছাড়া উচ্চশক্তি ডয়টেরন দ্বারাও $\pi$-মেসন উৎপন্ন করা হয়। নিম্নে প্রদত্ত বিভিন্ন পদ্ধতিতে $\pi$-মেসন উৎপন্ন করা যায় :

$$p+p \longrightarrow p+n+\pi^+$$
$$p+p \longrightarrow d+\pi^+$$
$$p+n \longrightarrow n+n+\pi^+$$
$$p+n \longrightarrow p+p+\pi^-$$

উচ্চশক্তি ফোটনের সাহায্যে আধানহীন $\pi^\circ$ মেসনও উৎপন্ন করা যায় :

$$p+\gamma \longrightarrow p+\pi^\circ$$
$$d+\gamma \longrightarrow d+\pi^\circ$$
$$d+\gamma \longrightarrow p+n+\pi^\circ$$

কৃত্রিম উপায়ে উৎপন্ন আহিত $\pi$-মেসনকে চৌম্বক ক্ষেত্রের দ্বারা বিচ্যুত করে খুব সঠিক ভাবে এদের ভর নির্ণয় করা যায়। এই ভাবে বিচ্যুত $\pi$-মেসনগুলিকে কেন্দ্রকীয় অবদ্রব ফোটোগ্রাফিক প্লেটের উপরে আপতিত করা হয়। প্লেটের মধ্যে তাদের পথসীমা (Range) পরিমাপ করে এবং চৌম্বক ক্ষেত্রের মধ্যে তাদের ভ্রমণপথের বক্রতা ব্যাসার্ধের মান থেকে কণিকাগুলির ভর পাওয়া যায়। তাছাড়া বিলম্বিত সমাপতন ব্যবস্থার (Delayed Coincidence Technique) সাহায্যে কৃত্রিম উপায়ে উৎপন্ন $\pi$-মেসনের গড় জীবনকালও খুব সঠিক ভাবে নির্ণয় করা হয়েছে।

উচ্চশক্তি $p-p$ বিক্রিয়ার ফলে ডয়টেরন এবং $\pi^+$ মেসন- উৎপাদনের সম্ভাব্যতা (Probability) এবং এর বিপরীত বিক্রিয়ার, অর্থাৎ ডয়টেরন ও $\pi^+$ মেসনের সংঘর্ষের ফলে দুটি প্রোটন উৎপাদনের সম্ভাব্যতার তুলনা করে $\pi^+$ মেসনের ঘূর্ণন কৌণিক ভরবেগ (Spin Angular Momentum)

নির্ণয় করা হয়। এই পরিমাপ থেকে $I(\pi^+)=0$ পাওয়া যায়। $\pi^-$ এবং $\pi^0$ মেসনের ঘূর্ণন কৌণিক ভরবেগও শূন্য পাওয়া যায়।

ইতিপূর্বে উল্লেখ করা হয়েছে যে ইউকাওয়ার তত্ত্ব অনুযায়ী $\pi$-মেসনের অনুরূপ কোন কণিকার আদান-প্রদানের (Exchange) ফলে নিউক্লীয়নগুলি পরস্পরকে আকর্ষণ করে। এই আদান-প্রদান নিম্নলিখিত উপায়ে নির্দেশ করা যায়ঃ

$$p_1 \xrightarrow{\pi^+} n_1 \; ; \; n_2+\pi^+ \longrightarrow p_2 \tag{20·1}$$

$$n_1 \xrightarrow{\pi^-} p_1 \; ; \; p_2+\pi^- \longrightarrow n_2 \tag{20·2}$$

$$p_1 \xrightarrow{\pi^0} p'_1 \; ; \; p_2+\pi^0 \longrightarrow p'_2 \tag{20·3}$$

$$n_1 \xrightarrow{\pi^0} n'_1 \; ; \; n_2+\pi^0 \longrightarrow n'_2 \tag{20·4}$$

(20·1) সমীকরণ অনুয়ায়ী $p_1$ প্রোটনটি $\pi^+$ মেসন নিঃসৃত করে $n_1$ নিউট্রনে রূপান্তরিত হয়। অপর একটি নিউট্রন $n_2$ এই নিঃসৃত $\pi^+$ মেসন শোষণ করে $p_2$ প্রোটনে পর্যবসিত হয়। পরমুহূর্তে এই বিক্রিয়া আবার বিপরীতগামী হয়। অর্থাৎ নবসৃষ্ট $p_2$ প্রোটনটি আবার পূর্বের মত $\pi^+$ মেসন নিঃসৃত করে $n_2$ নিউট্রনে রূপান্তরিত হয়। পূর্বে সৃষ্ট নিউট্রন $n_1$ এটিকে শোষণ করে আবার $p_1$ প্রোটনে রূপান্তরিত হয়। সমগ্র আদান-প্রদান প্রক্রিয়াটি $10^{-23}$ সেকেণ্ড মত সময়ের মধ্যে ঘটে। এইরূপ পারস্পরিক বিনিময় ক্রমাগতঃ চলতে থাকার ফলে প্রোটন এবং নিউট্রন পরস্পরের দিকে আকৃষ্ট হয়। (20·2) সমীকরণ অনুযায়ী $\pi^-$ মেসন আদান-প্রদানের ফলেও অনুরূপ আকর্ষণী বল উদ্ভূত হতে পারে। প্রোটন-প্রোটন বা নিউট্রন-নিউট্রন আকর্ষণী বলের উদ্ভব হয় আধানহীন $\pi^0$ মেসনের আদান-প্রদানের ফলে। এই শেষোক্ত আদান-প্রদান প্রক্রিয়াগুলিকে (20·3) এবং (20·4) সমীকরণ দ্বারা নির্দেশিত করা যায়।

এইরূপ আদান-প্রদানের সময়ে কিন্তু মেসনগুলি বাস্তব অবস্থায় সৃষ্ট হয় না। কারণ প্রোটন ও নিউট্রনের ভর পার্থক্য মাত্র 1·29 মি-ই-ভো শক্তির সমতুল। অপরপক্ষে $\pi$-মেসনের ভর-শক্তি প্রায় 140 মি-ই-ভো। প্রশ্ন উঠতে পারে যে এক্ষেত্রে নিউট্রন-প্রোটনের মধ্যে $\pi$-মেসনের আদান-প্রদান হয় কী রূপে? আপাতদৃষ্টিতে এইরূপ আদান-প্রদানের সময় শক্তি সংরক্ষণ সূত্র কার্যকরী হতে পারে না। এই প্রশ্নের উত্তরে বলা যায় যে যেহেতু

$\pi$-মেসনের আদান-প্রদান ঘটতে সময় লাগে মাত্র $10^{-23}$ সেকেণ্ড, অতএব হাইসেনবার্গের অনিশ্চয়তাবাদ (Uncertainty Principle) অনুযায়ী এক্ষেত্রে কণিকাগুলির শক্তির অনিশ্চয়তা খুব বেশী হয়। যেহেতু এই মতবাদ অনুযায়ী $\Delta E.\Delta t \sim h$ হয়, অতএব এই অনিশ্চয়তার পরিমাণ হয়

$$\Delta E \sim \frac{h}{\Delta t} = \frac{6{\cdot}62 \times 10^{-27}}{10^{-23} \times 1{\cdot}6 \times 10^{-6}} \approx 400 \text{ মি-ই-ভো}$$

অর্থাৎ শক্তির অনিশ্চয়তা মেসনের ভর-শক্তি অপেক্ষা অনেক বেশী হয়। সুতরাং এক্ষেত্রে শক্তি সংরক্ষণ সূত্র অমান্য হয় এই উক্তিটি অর্থহীন হয়ে পড়ে। বলা যায় যে এক্ষেত্রে $\pi$-মেসনটি 'অবাস্তব অবস্থায়' (Virtual State) সৃষ্ট হয়। একে বাস্তবে রূপায়িত করতে হলে বাইরে থেকে কয়েক শত মি-ই-ভো শক্তি সরবরাহ করা প্রয়োজন হয়। বস্তুতঃ পরীক্ষাগারে $\pi$-মেসন উৎপাদনের সময়ে আপতিত প্রোটনের শক্তি ন্যূনতম কয়েকশত মি-ই-ভো হওয়া প্রয়োজন, তা আগেই দেখা গেছে।

আহিত কণিকার মধ্যে তড়িৎচুম্বকীয় বিক্রিয়া অনুধাবনের জন্য সাধারণতঃ নিম্নলিখিত তড়িৎচুম্বকীয় তরঙ্গ-সমীকরণ ব্যবহার করা হয়ঃ

$$\nabla^2\phi - \frac{1}{c^2}\frac{\partial^2\phi}{\partial t^2} = 0$$

এখানে $\phi$ হচ্ছে তড়িৎচুম্বকীয় স্কেলার বিভব। এক্ষেত্রে বিক্রিয়ার দূরত্বসীমা (Range of Interaction) হচ্ছে অসীম (Infinite) বিস্তারী। এর কারণ হচ্ছে যে আহিত কণিকাগুলি শূন্য ভর সম্পন্ন ফোটন আদান-প্রদান করে বিক্রিয়া করে। ইউকাওয়া দেখান যে সীমিত দূরত্বসীমা পর্যন্ত বিস্তারী বিক্রিয়ার ক্ষেত্রে যে কণিকাটির আদান-প্রদান হয় তার ভর শূন্য হতে পারে না। এই যুক্তি অনুযায়ী এবং কণিকাটির ভর $m$ ধরে নিয়ে তিনি নিম্নে প্রদত্ত তরঙ্গ-সমীকরণ উদ্ভাবিত করেনঃ

$$\nabla^2\phi - \frac{1}{c^2}\frac{\partial^2\phi}{\partial t^2} - \left(\frac{2\pi mc}{h}\right)^2\phi = 0$$

$\phi$ হচ্ছে ইউকাওয়া আকর্ষণী বল উৎপাদক বিভব। উপরের তরঙ্গ-সমীকরণের সমাধান করে দেখা যায় যে এই বিভবের মান $R = h/2\pi mc$ অপেক্ষা অধিকতর দূরত্বে খুব কমে যায়। অর্থাৎ $R$ সংখ্যাটিকে এই বিভবের দূরত্বসীমা (Range) বলে মনে করা যায়। যেহেতু নিউক্লীয়নগুলির

পারস্পরিক বিক্রিয়ার দূরত্বসীমা প্রায় $2\times10^{-13}$ সেমি হয়, সুতরাং আমরা লিখতে পারি

$$\frac{h}{2\pi mc}=2\times10^{-13} \text{ সেমি}$$

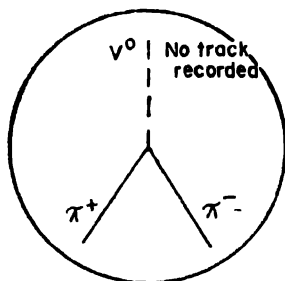
$$\text{অর্থাৎ } m=\frac{6.62\times10^{-27}m_e}{2\times3.14\times3\times10^{10}\times2\times10^{-13}\times9.11\times10^{-28}}$$

$$\approx 195\, m_e$$

## 20.11 : মৌলিক কণিকারাজি

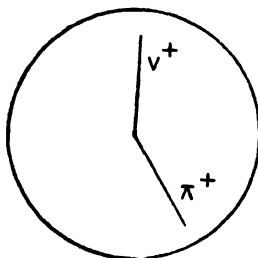
$\mu$ এবং $\pi$ মেসন আবিষ্কারের পরে মহাজাগতিক রশ্মির মধ্যে নানাবিধ নূতন ধরনের আহিত এবং আধানহীন কণিকা আবিষ্কৃত হয়। $10^9$ ইলেকট্রন-ভোল্ট মাত্রার শক্তি উৎপাদনকারী ত্বরণযন্ত্রসমূহ আবিষ্কারের পর (18.9 অনুচ্ছেদ দ্রষ্টব্য ) থেকে সুনিয়ন্ত্রিতভাবে এই সব নূতন কণিকার উৎপাদন এবং তাদের প্রকৃতি ও ধর্মাবলী ভালভাবে পর্যবেক্ষণ করা সম্ভবপর হয়। সাম্প্রতিক কালে তাদের প্রকৃতি ও ধর্মাবলী ব্যাখ্যার জন্য নানারূপ তত্ত্বও উদ্ভাবিত হয়েছে। বর্তমানে পৃথিবীর বিভিন্ন দেশে বহু সংখ্যক বিশিষ্ট বিজ্ঞানী এই অত্যন্ত গুরুত্বপূর্ণ এবং জটিল সমস্যা সঙ্কুল কণিকা-বিদ্যার (Particle Physics) গবেষণায় নিযুক্ত আছেন।

১৯৪৭ সালে রচেস্টার এবং বাট্লার (Rochester and Butler) নামক বৃটিশ বিজ্ঞানীদ্বয় মেঘ-কক্ষের সাহায্যে মহাজাগতিক রশ্মি সংক্রান্ত গবেষণা কালে একটি নূতন ধরনের কণিকার সন্ধান পান। তৎকালে এই কণিকাটির নামকরণ হয় $V$-কণিকা। মহাজাগতিক রশ্মির মধ্যে ইলেকট্রন-পজিট্রন রশ্মিধারা (Shower) ছাড়াও আর একপ্রকার উচ্চভেদী রশ্মিধারা (Penetrating Shower) উৎপন্ন হতে দেখা যায়। অত্যুচ্চ শক্তি সম্পন্ন কোন মহাজাগতিক কণিকা যখন বায়ুমণ্ডলস্থ গ্যাসের পরমাণু কেন্দ্রকের সংগে বিক্রিয়া করে তখন এইরূপ উচ্চভেদী রশ্মিধারা উৎপন্ন হয়। এই ধারার মধ্যে বেশীর ভাগ কণিকাই হচ্ছে $\pi$-মেসন। রচেষ্টার এবং বাটলার মেঘ-কক্ষের মধ্যে একটি 3 সেমি পুরু সীসার প্লেট স্থাপিত করে প্রায় 5000 আলোকচিত্র গ্রহণ করেন। এর মধ্যে পঞ্চাশটি চিত্রে উচ্চভেদী রশ্মিধারার নিদর্শন পাওয়া যায়। এদের মধ্যে দুটি চিত্রে ইংরাজী $V$-অক্ষরের অনুরূপ দুটি কণিকা ভ্রমণপথ (Tracks) দেখা যায়। একটি চিত্রে মেঘ-কক্ষস্থ সীসার

প্লেটের নীচে অবস্থিত একটি বিন্দু থেকে দুটি ভিন্ন পথাভিমুখী আহিত কণিকার ভ্রমণপথ শুরু হতে দেখা যায় ( 20·15 চিত্র দ্রষ্টব্য )। শক্তি এবং ভরবেগ

চিত্র 20·15

$V^0$ কণিকা আবিষ্কারের চিত্ররূপ।

সংরক্ষণ সূত্র প্রয়োগ করে রচেষ্টার ও বাট্‌লার সিদ্ধান্ত করেন যে এই দুটি কণিকা উৎপন্ন হয় একটি আধানহীন কণিকার বিঘটনের ফলে। তাঁদের মতে আহিত কণিকা দুটি প্রোটন অপেক্ষা লঘুতর ছিল এবং বিঘটনশীল আধানহীন কণিকাটির ভর খুব সম্ভবতঃ $770m_e$ অপেক্ষা বেশী এবং $1600m_e$ অপেক্ষা কম ছিল। আহিত কণিকাদ্বয়কে বিপরীত আধানবাহী দুটি $\pi$-মেসন ($\pi^+$ ও $\pi^-$) বলে অনুমান করলে বিঘটিত আধানহীন আদি $V^0$ কণিকাটির ভর প্রায় $1000m_e$ পাওয়া যায়।

দ্বিতীয় চিত্রে নিম্নাভিমুখী একটি আহিত কণিকার ভ্রমণপথের শেষ প্রান্ত

চিত্র 20·16

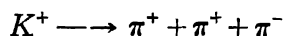
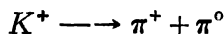
$V^+$ কণিকা আবিষ্কারের চিত্ররূপ।

থেকে অপর একটি আহিত কণিকার ভ্রমণপথ শুরু হতে দেখা যায় ( 20·16 চিত্র দ্রষ্টব্য )। শক্তি এবং ভরবেগ সূত্র প্রয়োগ করলে প্রতীয়মান হয় যে খুব

সম্ভবতঃ উপর দিক থেকে আগত প্রথম আহিত কণিকাটি বিঘটিত হয়ে নিম্নাভিমুখী দ্বিতীয় আহিত কণিকাটি সৃষ্টি করে এবং দুটি কণিকার ভ্রমণপথের ছেদবিন্দু থেকে আর একটি আধানহীন কণিকা অন্য কোন দিকে নির্গত হয়ে যায়। আধানহীনতার জন্য এর ভ্রমণপথ অদৃশ্য হয়। রচেষ্টার ও বাট্‌লার সিদ্ধান্ত করেন যে বিঘটিত আহিত কণিকাটির ভর খুব সম্ভবতঃ $980m_e$ অপেক্ষা বেশী কিন্তু প্রোটনের ভর অপেক্ষা কম ছিল। পূর্বের মতই বিঘটনের ফলে সৃষ্ট কণিকা দুটিকে $\pi$-মেসন ($\pi^+$ ও $\pi^0$) বলে অনুমান করলে আহিত আদি $V^+$ কণিকাটির ভর প্রায় $1000m_e$ পাওয়া যায়।

রচেষ্টার ও বাট্‌লারের পরীক্ষার কিছুদিন আগে দুজন ফরাসী বিজ্ঞানী (Leprince Ringuet ও L'heritier) $990m_e$ ভর বিশিষ্ট একটি আহিত কণিকার সন্ধান পান।

পরবর্তী যুগে মেঘ-কক্ষ ছাড়া কেন্দ্রকীয় অবদ্রব প্লেট ও বুদ্‌বুদ-কক্ষের সাহায্যে নানারূপ পরীক্ষা অনুষ্ঠিত করে এইরূপ আরও অনেক $V$-কণিকার নিদর্শন পাওয়া যায়। উপযুক্ত বিশ্লেষণের দ্বারা নিশ্চিত সিদ্ধান্ত করা হয় যে এদের মধ্যে কিছু অংশ হচ্ছে $\pi$-মেসন অপেক্ষা ভারী কিন্তু প্রোটন অপেক্ষা হাল্‌কা এক প্রকার কণিকা, যাদের বর্তমানে $K$ মেসন নামে অভিহিত করা হয়। $K^+$ এবং $K^0$, দুই প্রকার ভারী মেসন দেখা যায়। সঠিকভাবে পরিমাপ করে $K^+$ মেসনের ভর $966m_e$ পাওয়া যায়। $K^+$ মেসনগুলি এক ইলেকট্রনীয় আধান বহন করে। এরা খুব ক্ষণস্থায়ী হয়। $K^+$ মেসনের গড় জীবনকাল হচ্ছে প্রায় $1{\cdot}2 \times 10^{-8}$ সেকেণ্ড। এরা নানাভাবে বিঘটিত হয়। এর মধ্যে নিম্নলিখিত বিঘটন প্রক্রিয়া দুটি বিশেষভাবে উল্লেখযোগ্য :

$$K^+ \longrightarrow \pi^+ + \pi^0$$
$$K^+ \longrightarrow \pi^+ + \pi^+ + \pi^-$$

এই দুই প্রকার বিঘটন আবিষ্কারের পরে প্রথম দিকে অনুমান করা হয় যে বিঘটনশীল কণিকা দুটি ভিন্ন। এদের নাম দেওয়া হয় যথাক্রমে $\theta$ এবং $\tau$ মেসন। একই ভৌত ধর্মাবলী সম্পন্ন কণিকাগুলির উপরোক্ত দুই ভিন্ন ধরনের বিঘটন '$\tau - \theta$ রহস্য' ($\tau - \theta$ Puzzle) নামে বিজ্ঞানীমহলে সুপরিচিত। এর কারণ অনুসন্ধান করতে গিয়ে লী এবং ইয়াং (T. D. Lee and C. N. Yang) নামক চীনদেশ থেকে আগত এবং বর্তমানে আমেরিকার নাগরিক দুই বিজ্ঞানী এক অত্যন্ত গুরুত্বপূর্ণ মৌলিক তত্ত্ব আবিষ্কার করেন।

একে বলা হয় 'হীনবল বিক্রিয়ার ক্ষেত্রে সমতার অসংরক্ষণ' (Non-Conservation of Parity in Weak Interaction)। সমতা (Parity) হচ্ছে বিভিন্ন মৌলিক কণিকার একটি গুরুত্বপূর্ণ ভৌত ধর্ম যা শুধু কোয়ানটাম বলবিদ্যা তত্ত্বের সাহায্যে ব্যাখ্যা করা সম্ভব।

এখানে উল্লেখযোগ্য যে প্রকৃতিতে যে সমস্ত বিক্রিয়ার কথা জানা আছে তাদের মধ্যে আছে 'প্রবল বিক্রিয়া' (Strong Interaction), 'তড়িৎ-চুম্বকীয় বিক্রিয়া' (Electromagnetic Interaction) এবং 'হীনবল বিক্রিয়া' (Weak Interaction)। নিউক্লীয়নগুলির পারস্পরিক বিক্রিয়া বা নিউক্লীয়ন এবং $\pi$-মেসনের বিক্রিয়াকে প্রবল বিক্রিয়া বলা হয়। এই জাতীয় বিক্রিয়া অনুষ্ঠিত হতে সময় লাগে প্রায় $10^{-23}$ সেকেণ্ড। আহিত কণিকা-সমূহের মধ্যে পারস্পরিক বিক্রিয়াকে বলা হয় তড়িৎচুম্বকীয় বিক্রিয়া। এক্ষেত্রে বিক্রিয়া কাল $10^{-18}$ সেকেণ্ড মত হয়। এই বিক্রিয়া প্রবল বিক্রিয়া অপেক্ষা অনেক ক্ষীণতর হয়। যে বিক্রিয়ার ফলে $\beta$-বিঘটন এবং বিভিন্ন মৌলিক-কণিকার বিঘটন হয়, তাকে বলা হয় হীনবল বিক্রিয়া। এক্ষেত্রে বিক্রিয়া কাল $10^{-8}$ সেকেণ্ড মত হয়। এই বিক্রিয়া পূর্বোক্ত দুই প্রকার বিক্রিয়া অপেক্ষা আরও ক্ষীণতর হয়। প্রথমোক্ত দুই প্রকার বিক্রিয়ার ক্ষেত্রে সমতা (Parity) সংরক্ষিত হয়। লী এবং ইয়াং $\tau-\theta$ রহস্য বিবেচনা করতে গিয়ে সন্দেহ করেন যে হীনবল বিক্রিয়ার ক্ষেত্রে সমতা সংরক্ষিত হয় না। মাদাম উ (C. S. Wu) এবং তাঁর সহকর্মীবৃন্দ লী এবং ইয়াং কর্তৃক প্রস্তাবিত সমবর্তিত (Polarized) $Co^{60}$ কেন্দ্রকের $\beta$-বিঘটন সম্পর্কিত পরীক্ষা থেকে এই তথ্যের সত্যতা দৃঢ়ভাবে প্রতিষ্ঠিত করেন। এ সম্পর্কে বিস্তারিত আলোচনা বর্তমান গ্রন্থের বিষয় বহির্ভূত।

আধানহীন $K^0$ মেসনগুলির দুই প্রকার গড় জীবনকাল পরিলক্ষিত হয়, $0{\cdot}9\times10^{-10}$ সেকেণ্ড এবং $6\times10^{-8}$ সেকেণ্ড। এদের ক্ষেত্রেও নানারূপ বিকল্প বিঘটন প্রক্রিয়া দেখা যায়।

রচেষ্টার ও বাট্‌লারের পূর্ববর্ণিত মেঘ-কক্ষ চিত্র দুটিকে ভালভাবে বিশ্লেষণ করে পরবর্তী যুগে প্রতীয়মান হয় যে এদের মধ্যে প্রাপ্ত বিঘটনশীল কণিকা-দুটির ভর খুব সম্ভবতঃ প্রোটনের ভর অপেক্ষা বেশী ছিল। আরও অনেকে এইরূপ কণিকার সন্ধান পান। অর্থাৎ উপরোল্লিখিত $V$-কণিকাগুলিকে $V_1$ ও $V_2$ দুই শ্রেণীতে ভাগ করা যায়। $V_1$ কণিকাগুলি হচ্ছে উপরে আলোচিত $K$-মেসন, যারা $\pi$-মেসন অপেক্ষা ভারী কিন্তু প্রোটন অপেক্ষা

হাল্‌কা। অপরপক্ষে $V_2$ কণিকাগুলি হচ্ছে নিউক্লীয়ন (প্রোটন এবং নিউট্রন) অপেক্ষা ভারী এক প্রকার বিঘটনশীল কণিকা। এদের নাম দেওয়া হয়েছে 'হাইপেরন' (Hyperon)। এদের মধ্যে সর্বপ্রথম নিশ্চিতভাবে সনাক্ত করা হয় এক জাতীয় আধানহীন কণিকা, যাদের বিঘটনের ফলে একটি প্রোটন ও একটি $\pi^-$ মেসন উৎপন্ন হয়। এই কণিকাগুলিকে $\Lambda^0$ হাইপেরন নামে অভিহিত করা হয়। এদের বিঘটন প্রক্রিয়া হচ্ছে

$$\Lambda^0 \longrightarrow p + \pi^-$$

এদের ভর হচ্ছে $2182m_e$ এবং গড় জীবনকাল হচ্ছে $2{\cdot}5 \times 10^{-10}$ সেকেণ্ড। পরবর্তী যুগে আরও কতকগুলি হাইপেরন আবিষ্কৃত হয়, যথা $\Sigma$-হাইপেরন ($\Sigma^+$, $\Sigma^0$ এবং $\Sigma^-$), $\Xi$-হাইপেরন ($\Xi^0$ এবং $\Xi^-$) ইত্যাদি। (20·1) সারণীতে বিভিন্ন জাতীয় মৌলিক কণিকাসমূহের তালিকা এবং এদের কয়েকটি গুরুত্বপূর্ণ ভৌতধর্ম লিপিবদ্ধ করা হয়েছে।

এখানে উল্লেখযোগ্য যে হাইপেরন এবং $K$-মেসনগুলি সব সময় একই সংগে সৃষ্ট হয়। এই তথ্য ব্যাখ্যা করার জন্য বিজ্ঞানীগণ এই সব কণিকার একটি নূতন ধর্মের কথা কল্পনা করেন, যাকে বলা হয় 'অদ্ভুতত্ত্ব' (Strangeness)। এই জাতীয় প্রত্যেকটি কণিকার একটা 'অদ্ভুতত্ত্ব কোয়ানটাম সংখ্যা' থাকে। এই কণিকাগুলির উৎপাদন এবং বিক্রিয়ার সময়ে এই অদ্ভুতত্ত্ব কোয়ানটাম সংখ্যা সংরক্ষিত (Conserved) হয় বলে ধরে নিলে হাইপেরন এবং মেসনের 'সংশ্লিষ্ট উৎপাদন' (Associated Production) ব্যাখ্যা করা যায়। অবশ্য এদের বিঘটনের সময়ে অদ্ভুতত্ত্ব সংরক্ষিত হয় না। সেইজন্য এদের বিঘটন অপেক্ষাকৃত অনেক মন্থর হারে ($10^{-10}$ থেকে $10^{-8}$ সেকেণ্ড সময়ে) অনুষ্ঠিত হয়। যদিও প্রবল বিক্রিয়ার (Strong Interaction) ফলে এদের উৎপাদন ঘটে, এদের বিঘটন কিন্তু হীনবল বিক্রিয়ার (Weak Interaction) প্রভাবে ঘটে। এদের এই অদ্ভুত আচরণের জন্য $K$-মেসন এবং হাইপেরনগুলিকে 'অদ্ভুত কণিকা' (Strange Particles) আখ্যা দেওয়া হয়।

মৌলিক কণিকাসমূহকে (Fundamental Particles) তিন শ্রেণীতে ভাগ করা যায়, লেপ্‌টন (Lepton), মেসন (Meson) এবং ব্যারিয়ন (Baryon)। এছাড়া তড়িৎচুম্বকীয় বিক্রিয়া উৎপাদনকারী কণিকা ফোটন এবং মহাকর্ষজ বিক্রিয়া উৎপাদনকারী কাল্পনিক কণিকা 'গ্র্যাভিটন' (Graviton) নামক দুটি কণিকাকে চতুর্থ আর এক শ্রেণীর

## সারণী 20·1

| কণিকা | চিহ্ন | ভর ( ইলেকট্রনীয় ভরের এককে ) | আধান | ঘূর্ণন | গড় জীবনকাল ( সেকেণ্ড ) | বিপরীত-কণিকা |
|---|---|---|---|---|---|---|
| গ্র্যাভিটন ( ? ) | $g$ | 0 | 0 | 2 | স্থায়ী | $g$ ( একই কণিকা ) |
| ফোটন | $\gamma$ | 0 | 0 | 1 | স্থায়ী | $\gamma$ ( একই কণিকা ) |
| **লেপটন** | | | | | | |
| নিউট্রিনো | $\nu$ | 0 | 0 | $\frac{1}{2}$ | স্থায়ী | $\bar{\nu}$ ( বিপরীত-নিউট্রিনো ) |
| ইলেকট্রন | $e^-$ | 1 | $-e$ | $\frac{1}{2}$ | স্থায়ী | $e^+$ ( পজিট্রন ) |
| মিউ ( ঋণাত্মক ) | $\mu^-$ | 207 | $-e$ | $\frac{1}{2}$ | $2{\cdot}2 \times 10^{-6}$ | $\mu^+$ ( মিউ ধনাত্মক ) |
| **মেসন** | | | | | | |
| পাই ( শূন্য ) | $\pi^0$ | 264·2 | 0 | 0 | $1{\cdot}78 \times 10^{-16}$ | $\pi^0$ ( একই কণিকা ) |
| পাই ( ধনাত্মক ) | $\pi^+$ | 273·2 | $+e$ | 0 | $2{\cdot}55 \times 10^{-8}$ | $\pi^-$ ( পাই ঋণাত্মক ) |
| কে ( ধনাত্মক ) | $K^+$ | 966·6 | $+e$ | 0 | $1{\cdot}22 \times 10^{-8}$ | $\overline{K}$ ( কে ঋণাত্মক ) |
| কে ( শূন্য ) | $K^0$ | 974 | 0 | 0 | $0{\cdot}9 \times 10^{-10}$ ; $5{\cdot}8 \times 10^{-8}$ | $\overline{K}^0$ ( বিপরীত 'কে' শূন্য ) |
| **ব্যারিয়ন** | | | | | | |
| প্রোটন | p | 1836·12 | $+e$ | $\frac{1}{2}$ | স্থায়ী | $\overline{p}$ ( বিপরীত প্রোটন ) |
| নিউট্রন | n | 1838·65 | 0 | $\frac{1}{2}$ | $1{\cdot}11 \times 10^3$ | $\overline{n}$ ( বিপরীত নিউট্রন ) |
| ল্যাম্‌ডা | $\Lambda^0$ | 2182·8 | 0 | $\frac{1}{2}$ | $2{\cdot}51 \times 10^{-10}$ | $\overline{\Lambda}^0$ ( বিপরীত ল্যাম্‌ডা ) |
| সিগ্‌মা ( ধনাত্মক ) | $\Sigma^+$ | 2327·7 | $+e$ | $\frac{1}{2}$ | $0{\cdot}81 \times 10^{-10}$ | $\overline{\Sigma}^-$ ( বিপরীত সিগ্‌মা ঋণাত্মক ) |
| সিগ্‌মা ( শূন্য ) | $\Sigma^0$ | 2331·8 | 0 | $\frac{1}{2}$ | $<10^{-14}$ | $\overline{\Sigma}^0$ ( বিপরীত সিগ্‌মা শূন্য ) |
| সিগ্‌মা ( ঋণাত্মক ) | $\Sigma^-$ | 2340·5 | $-e$ | $\frac{1}{2}$ | $1{\cdot}65 \times 10^{-10}$ | $\overline{\Sigma}^+$ ( বিপরীত সিগ্‌মা ধনাত্মক) |
| এক্‌সাই ( শূন্য ) | $\Xi^0$ | 2565 | 0 | $\frac{1}{2}$ | $3{\cdot}05 \times 10^{-10}$ | $\overline{\Xi}^0$ ( বিপরীত এক্‌সাই শূন্য ) |
| এক্‌সাই ( ঋণাত্মক ) | $\Xi^-$ | 2580 | – | $\frac{1}{2}$ | $1{\cdot}75 \times 10^{-10}$ | $\overline{\Xi}^+$ ( বিপরীত এক্‌সাই ধনাত্মক ) |

অন্তর্ভুক্ত করা হয়। (20·1) সারণীতে কণিকাগুলির উপরোক্ত শ্রেণী বিভাগ প্রদর্শিত হয়েছে। এই স্যরণী থেকে দেখা যায় যে লেপ্‌টন শ্রেণীভুক্ত কণিকা হচ্ছে তিন প্রকার—নিউট্রিনো, ইলেকট্রন এবং মিউয়ন ($\mu$-মেসন)। শেষোক্ত কণিকাগুলিকে যদিও প্রাথমিক যুগে $\mu$-মেসন নামে অভিহিত করা হত, পরবর্তী যুগে এদের বিভিন্ন ধর্মাবলী, যথা কেন্দ্রকের সংগে বিক্রিয়ার ক্ষীণতা, ঘূর্ণন ($\frac{1}{2}$) ইত্যাদি বিবেচনা করে এদের মেসন শ্রেণীভুক্ত না করে-লেপ্‌টন শ্রেণীভুক্ত করাই যুক্তিসংগত বলে প্রতীয়মান হয়। এগুলি ফের্মি-ডিরাক সংখ্যায়ন মেনে চলে। সেজন্য এইরূপ কণিকাকে 'ফের্মিয়ন' (Fermion) আখ্যা দেওয়া হয়।

মেসন শ্রেণীর মধ্যে আছে পাইয়ন ($\pi$-মেসন), কেয়ন ($K$-মেসন) এবং $\eta^{\circ}$ মেসন। এদের ঘূর্ণন হচ্ছে শূন্য এবং এরা কেন্দ্রকের সংগে খুব প্রবলভাবে বিক্রিয়া করে। এরা বোস* আইনষ্টাইন সংখ্যায়ন মেনে চলে। সেইজন্য এইরূপ কণিকাকে 'বোসন' (Boson) আখ্যা দেওয়া হয়।

নিউক্লীয়ন (নিউট্রন ও প্রোটন) এবং হাইপেরনগুলিকে সমষ্টিগতভাবে ব্যারিয়ন (Baryon) নামে অভিহিত করা হয়। নিউট্রন এবং হাইপেরনগুলির ভর প্রোটনের ভর অপেক্ষা বেশী। এদের ঘূর্ণন $\frac{1}{2}$ হয় এবং এরা ফের্মি-ডিরাক সংখ্যায়ন মেনে চলে। ব্যারিয়ন ও মেসনগুলির নিজেদের মধ্যে এবং পরস্পরের মধ্যে 'প্রবল-বিক্রিয়া' কার্যকরী হয়। এই দুই শ্রেণীর প্রবল বিক্রিয়াশীল কণিকাকে মিলিত ভাবে হ্যাড্রন (Hadron) অ্যাখ্যা দেওয়া হয়।

এখানে উল্লেখযোগ্য যে বিভিন্ন শ্রেণীভুক্ত কণিকাগুলির প্রত্যেকটিরই সমভর সম্পন্ন বিপরীত কণিকা (Anti Particle) থাকে। ইলেকট্রনের বিপরীত কণিকা পজিট্রনের কথা আমরা জানি। $\mu^{+}$ এবং $\mu^{-}$ পরস্পরের বিপরীত কণিকা। অনুরূপে $\pi^{+}$ ও $\pi^{-}$ পরস্পরের বিপরীত কণিকা। নিউট্রিনোর বিপরীত কণিকা, বিপরীত-নিউট্রিনোর কথা ইতিপূর্বে উল্লেখ করা হয়েছে (13·6 অনুচ্ছেদ দ্রষ্টব্য)।

* বিঃ দ্রঃ। প্রখ্যাত ভারতীয় বিজ্ঞানী সত্যেন্দ্রনাথ বসু (১৯২৪) এই সংখ্যায়নের আবিষ্কারক। তিনি ফোটনের ক্ষেত্রে এই সংখ্যায়নের সার্থক প্রয়োগ করে প্ল্যাংকের কৃষ্ণবস্তু বিকিরণ ফর্মুলা প্রতিপন্ন করেন। পরে আইনষ্টাইন অন্যান্য ক্ষেত্রে এই সংখ্যায়ন প্রয়োগের সম্ভাব্যতার পথ প্রদর্শন করেন।

সাম্প্রতিক কালে উচ্চশক্তি ত্বরণযন্ত্রের সাহায্যে প্রোটন ও নিউট্রনের বিপরীত কণিকা বিপরীত প্রোটন ও বিপরীত নিউট্রন উৎপন্ন করা হয়েছে। এদের আবিষ্কার সম্বন্ধে (20·12) অনুচ্ছেদে আলোচনা করা হবে।

কোন কণিকার আধানের যা চিহ্ন (+ বা −) বিপরীত কণিকার আধানের চিহ্ন ঠিক তার বিপরীত হয়, যদিও এদের মান সমান হয়। বিঘটনশীল কণিকার বিপরীত কণিকাও বিঘটনশীল হয় এবং দুটির গড় জীবনকাল সমান হয়। দুই ক্ষেত্রে বিঘটনের ফলে সৃষ্ট কণিকাগুলি পরস্পরের বিপরীত কণিকা হয়। যথা $\pi^+$ বিঘটনের ফলে $\mu^+$ ও $\nu$ সৃষ্ট হয়; বিপরীত কণিকা $\pi^-$ বিঘটনের ফলে $\mu^-$ ও $\bar{\nu}$ সৃষ্ট হয়।

(20·1) সারণীতে বিভিন্ন কণিকার সম্ভাব্য বিপরীত কণিকাগুলিকে কণিকা-চিহ্নের মাথায় একটি মাত্রা দ্বারা নির্দেশিত করা হয়েছে। কোন কণিকা এবং তার বিপরীত কণিকা পরস্পরের সম্মুখীন হলে দুটিরই বিনাশ (Annihilation) ঘটে এবং তাদের ভর-শক্তির রূপান্তর ঘটে। ইলেকট্রন-পজিট্রনের ক্ষেত্রে বিনাশের ফলে দুটি $\gamma$-ফোটন সৃষ্ট হয়।

আধানহীন কণিকার ক্ষেত্রে বিপরীত কণিকার পার্থক্য সহজবোধ্য নয়। এই পার্থক্য এদের ঘূর্ণন, চৌম্বক-ভ্রামক প্রভৃতির বিন্যাস এবং বিঘটনের ফলে সৃষ্ট কণিকাগুলির প্রকৃতি বিবেচনা করলে বোঝা যায়। এখানে উল্লেখযোগ্য যে লেপ্‌টন ও ব্যারিয়ন শ্রেণীর আধানহীন কণিকাগুলি তাদের বিপরীত কণিকাসমূহ থেকে ভিন্ন হয়। যথা নিউট্রন $n$ ও বিপরীত নিউট্রন $\bar{n}$ ভিন্ন কণিকা। প্রথমটির বিঘটনের ফলে ধনাত্মক প্রোটন $p$, ঋণাত্মক $\beta^-$ ও $\bar{\nu}$ (বিপরীত নিউট্রিনো) সৃষ্ট হয়; দ্বিতীয়টির বিঘটনের ফলে ঋণাত্মক বিপরীত প্রোটন $\bar{p}$, ধনাত্মক $\beta^-$ ও $\nu$ (নিউট্রিনো) উৎপন্ন হয়। অন্য দুটি শ্রেণীভুক্ত আধানহীন কণিকাগুলি ও তাদের বিপরীত কণিকাগুলি অভিন্ন। যথা $\pi^\circ$ মেসন হচ্ছে এর নিজের বিপরীত কণিকা।

(20·1) সারণীতে প্রদত্ত মৌলিক কণিকাগুলি ছাড়াও সাম্প্রতিক কালে আর এক শ্রেণীর অত্যন্ত ক্ষণস্থায়ী কণিকার অস্তিত্বের নিদর্শন পাওয়া গেছে। অতি উচ্চশক্তি কণিকা ত্বরণযন্ত্রের সাহায্যে এদের উৎপন্ন করা হয়। এদের গড় জীবনকাল $10^{-22}$ সেকেণ্ড মত হয়। এরা সম্ভবতঃ বিভিন্ন মেসন ও ব্যারিয়নের অত্যন্ত ক্ষণস্থায়ী উত্তেজিত অবস্থার নিদর্শন। নির্দিষ্ট কতকগুলি শক্তিতে এই জাতীয় কণিকা উৎপাদনের সম্ভাব্যতা উচ্চতম হয় বলে এগুলিকে

'অনুনাদ-কণিকা' (Resonance Particles) বলা হয়। এদের ক্ষণস্থায়িত্ব থেকে বোঝা যায় যে এদের উৎপাদন এবং বিঘটন প্রবল বিক্রিয়ার মাধ্যমে হয়।

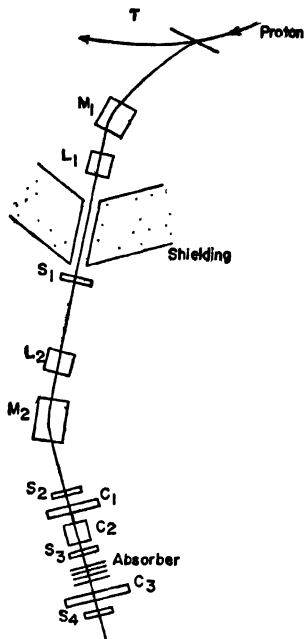
এতগুলি মৌলিক কণিকার মধ্যে মাত্র কয়েকটির অস্তিত্বের তত্ত্বগত যৌক্তিকতা বোধগম্য হয়। যথা ইলেকট্রন, প্রোটন এবং নিউট্রন, এই তিন প্রকার কণিকা হচ্ছে পরমাণু গঠনের মূল উপাদান। আবার আহিত কণিকা সমূহের মধ্যে তড়িৎচুম্বকীয় বিক্রিয়া (Electromagnetic Interaction) সংঘটিত হয় ফোটনের আদান-প্রদানের (Exchange) ফলে। অনুরূপে নিউক্লীয়নগুলির মধ্যেকার প্রবল বিক্রিয়া (Strong Interaction) সংঘটিত হয় $\pi$-মেসনের আদান-প্রদানের ফলে। অপরপক্ষে নিউট্রিনো, মিউয়ন, $K$-মেসন, বিভিন্ন হাইপেরন প্রভৃতি কণিকাগুলি প্রকৃতিতে কী প্রয়োজনীয় কর্তব্য সাধন করে, এ প্রশ্নের মীমাংসা এখনও হয়নি। এই সব কণিকা সত্য সত্যই মৌলিক, না এদের চেয়ে আরও মৌলিক প্রকৃতির কোন কণিকার দ্বারা এরা গঠিত এ প্রশ্নেরও কোন সঠিক উত্তর পাওয়া যায় না। কণিকাগুলির শ্রেণীবিভাগ ছাড়াও, নানাবিধ সংরক্ষণ সূত্রের সন্ধান পাওয়া গেছে, যার দ্বারা এদের উৎপাদন প্রক্রিয়া, পারস্পরিক বিক্রিয়া, বিঘটন প্রভৃতির কারণ প্রতীয়মান হয়। শক্তি, আধান, ভরবেগ, ঘূর্ণন প্রভৃতি সুপরিজ্ঞাত সংরক্ষণ সূত্রাবলী ছাড়াও সমতা, আইসো-ঘূর্ণন (Iso-Spin), অদ্ভুতত্ব, লেপ্‌টন-সংখ্যা, ব্যারিয়ন-সংখ্যা প্রভৃতির সংরক্ষণ সূত্র বিবেচনা করে এইসব কণিকার উৎপাদন এবং প্রকৃতি সম্বন্ধে নানারূপ দুরূহ তত্ত্ব উদ্ভাবিত হয়েছে। নিশিজিমা (Nishijima), গেল্‌মান (Gell-Mann), পেয়্‌স (Pais) প্রভৃতি বিজ্ঞানীগণ এ বিষয়ে পথিকৃৎ।

এখানে উল্লেখযোগ্য যে লেপ্‌টন ও ব্যারিয়নের ক্ষেত্রে যথাক্রমে উপরোল্লিখিত লেপ্‌টন-সংখ্যা ও ব্যারিয়ন-সংখ্যা সংরক্ষণ সূত্র দুটি প্রযোজ্য। কোন অন্তরিত মণ্ডলীতে (Isolated System), লেপ্‌টন ও বিপরীত লেপ্‌টনের (অথবা ব্যারিয়ন ও বিপরীত ব্যারিয়নের) সংখ্যার পার্থক্য ধ্রুবক থাকে। যথা $\mu^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\mu$ প্রক্রিয়ায় বিঘটনের আগে একটি মাত্র লেপ্‌টন ($\mu^-$) থাকে। বিঘটনের পরে দুটি লেপ্‌টন ($e^-$ ও $\nu_\mu$) এবং একটি বিপরীত লেপ্‌টন ($\bar{\nu}_e$) পাওয়া যায়।

তাত্ত্বিক বিচারে অনেক সময়ে উপরে আলোচিত কতকগুলি কণিকাকে যুগ্ম কণিকা হিসাবে দেখা হয়। যথা অনুনাদ কণিকাগুলিকে বিভিন্ন হাইপেরনের উত্তেজিত অবস্থা বলে মনে করা হয়। হাইপেরনগুলিকেও কেউ কেউ নিউক্লীয়ন

ও $\pi$-মেসনের দ্বারা গঠিত যুগ্ম কণিকা বলে মনে করেন। বস্তুতঃ এদের সবগুলিকেই কোন একটি নির্দিষ্ট কণিকার বিভিন্ন শক্তি অবস্থা বলে কল্পনা করা যেতে পারে। অনেক বিজ্ঞানীর মতে এই সমস্ত কণিকাই একটি বিশেষ মৌলিক উপাদান থেকে গঠিত। এই রহস্যময় মৌলিক উপাদানের নাম দেওয়া হয়েছে 'কোয়ার্ক' (Quark)। সমগ্র সৃষ্টি রহস্যের মূলে আছে এই কোয়ার্ক বলে এইসব বিজ্ঞানী অনুমান করেন। কোয়ার্কের অস্তিত্বের কোন পরীক্ষামূলক প্রমাণ এখন পর্যন্ত পাওয়া যায়নি।

## 20·12 : বিপরীত প্রোটন এবং বিপরীত নিউট্রন

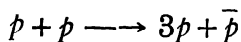
১৯৫৫ সালে সেগ্রে (Emilio Segre), চেম্বারলেন (Owen Chamberlain) এবং তাঁদের সহকর্মীবৃন্দ ক্যালিফর্নিয়া বিশ্ববিদ্যালয়ের

চিত্র 20·17

বিপরীত প্রোটন আবিষ্কারের পরীক্ষা ব্যবস্থা।

6 জি-ই-ভো ( $6\times10^9$ ই-ভো ) শক্তি উৎপাদনকারী বিভাট্রন যন্ত্রের সাহায্যে বিপরীত প্রোটন (Anti Proton) উৎপাদন করতে সমর্থ হন। তাঁদের

এই আবিষ্কারের জন্য সেগ্রে ও চেম্বারলেন ১৯৫৯ সালে যুক্তভাবে নোবেল পুরস্কার প্রাপ্ত হন।

(20·17) চিত্রে তাঁদের পরীক্ষা প্রণালী প্রদর্শিত হয়েছে। 6 জি-ই-ভো শক্তি সম্পন্ন প্রোটনগুচ্ছকে T একটি তামার লক্ষ্যবস্তুর (Target) উপর আপতিত করা হয়। তামার কেন্দ্রকের মধ্যে $p-p$ বিক্রিয়ার ফলে নিম্নলিখিত সমীকরণ অনুযায়ী বিপরীত প্রোটন উৎপন্ন হয়ঃ

$$p+p \longrightarrow 3p+\bar{p}$$

উৎপন্ন বিপরীত প্রোটনগুলির আধান ঋণাত্মক হওয়ার জন্য বিভাট্রনের চৌম্বক ক্ষেত্রের দ্বারা সেগুলি আপতিত প্রোটনের ভ্রমণপথের বিপরীত বক্রতা সম্পন্ন পথ ধরে নির্গত হয়ে আসে। সংগে সংগে বহু সংখ্যক মেসনও একই পথ ধরে বেরিয়ে আসে। $M_1$ এবং $M_2$ চুম্বক দুটির সাহায্যে নির্দিষ্ট ভরবেগ সম্পন্ন কণিকাসমূহকে বেছে নেওয়া যায়। এইভাবে প্রায় $0·99c$ বেগ সম্পন্ন $\pi$-মেসন এবং $0·78\ c$ বেগ সম্পন্ন বিপরীত প্রোটনগুলিকে বেছে নেওয়া হয়। $S_1$, $S_2$, $S_3$ হচ্ছে তিনটি চমক সংখ্যায়ক (Scintillation Counters) ও $C_1$, $C_2$ হচ্ছে দুটি চেরেনকভ সংখ্যায়ক (Cerenkov Counters)। $C_1$ সংখ্যায়কটি কেবল $0·79c$ অপেক্ষা উচ্চতর বেগ সম্পন্ন কণিকাগুলিকে (অর্থাৎ $\pi$-মেসনগুলিকে) নির্দেশিত করে, আর $C_2$ সংখ্যায়কটি কেবল $0·75c$ থেকে $0·79c$ পর্যন্ত বেগ সম্পন্ন বিপরীত প্রোটনগুলিকে নির্দেশিত করে। $S_1$ এবং $S_2$ সংখ্যায়কদ্বয়ের ব্যবধান 12 মিটার রাখা হয়। এই পথ অতিক্রম করতে $\pi$-মেসনগুলির সময় লাগে প্রায় 40 ন্যানো সেকেণ্ড (1 ন্যানো সেকেণ্ড $=10^{-9}$ সেকেণ্ড) এবং বিপরীত প্রোটনগুলির লাগে প্রায় 51 ন্যানো সেকেণ্ড। $S_1$, $S_2$, $S_3$ এবং $C_2$ সংখ্যায়কগুলিকে সমাপতন (Coincidence) ব্যবস্থানুযায়ী সংযুক্ত করা হয়। $C_1$ সংখ্যায়কটিকে এদের সংগে বিষমাপতন (Anti Coincidence) ব্যবস্থার দ্বারা সংযুক্ত করা হয়। ফলে $\pi$-মেসনগুলি কোন সমাপতন ঝলক (Coincidence Pulse) উৎপন্ন করে না। এই ব্যবস্থার ফলে কেবল বিপরীত প্রোটন দ্বারা উৎপন্ন সমাপতন ঝলকই নির্দেশিত হয়। এই ভাবে বিপরীত প্রোটনের উৎপাদন নিশ্চিত ভাবে প্রমাণ করা হয়।

আরও সুনিশ্চিত হবার জন্য বিপরীত প্রোটনগুলিকে একটি বুদ্বুদ-কক্ষের মধ্য দিয়ে পাঠান হয়। এর মধ্যে প্রোটনের সংগে বিক্রিয়ার দ্বারা এদের

বিনাশ ঘটে, যার ফলে কয়েকটি $\pi$-মেসন, নিউক্লীয়ন এবং $K$-মেসন সৃষ্ট হয়। কেন্দ্রকীয় অবদ্রব প্লেটের মধ্যেও অনুরূপ বিক্রিয়া অনুষ্ঠিত হতে দেখা যায়। $\bar{p}$ এবং $p$-এর বিক্রিয়া নিম্নলিখিত সমীকরণ দ্বারা নির্দেশিত করা যায় ঃ

$$\bar{p}+p\rightarrow(5 \text{ থেকে } 10)\pi+\text{নিউক্লীয়ন}+K$$

খুব সম্ভবতঃ প্রথমে $\pi$-মেসনগুলি সৃষ্ট হয়। পরে এদের সংগে নিউক্লীয়নের বিক্রিয়ার ফলে অন্য কণিকাগুলি উৎপন্ন হয়। কেন্দ্রকীয় অবদ্রবের মধ্যে এদের ভ্রমণপথগুলি একই বিন্দু থেকে নিঃসৃত হয়ে একটি তারকাকৃতি (Star) চিত্র উৎপন্ন করে।

বিপরীত প্রোটনের ভর প্রোটনের ভরের সংগে সমান। এদের আধান ঋণাত্মক এবং এক ইলেকট্রনীয় আধানের সমান। এদের ঘূর্ণন $\frac{1}{2}$ এবং চৌম্বক-ভ্রামক প্রোটনের চৌম্বক-ভ্রামকের সমান, কিন্তু বিপরীতমুখী $(-\mu_p)$ হয়। যেহেতু আহিত কণিকাসমূহের পারস্পরিক বিক্রিয়ার বাহক হচ্ছে একটি ফোটন, সেইজন্য ইলেকট্রন-পজিট্রন বিনাশের ফলে দুটি ফোটন সৃষ্ট হয় ( 14·6 অনুচ্ছেদ দ্রষ্টব্য )। অপরপক্ষে নিউক্লীয়নগুলির পারস্পরিক বিক্রিয়ার বাহক $\pi$-মেসন হওয়ার জন্য প্রোটন এবং বিপরীত প্রোটনের বিনাশের ফলে কতকগুলি ( দুই বা ততোধিক ) $\pi$-মেসন উৎপন্ন হয়।

বিপরীত প্রোটন আবিষ্কারের পরে বিপরীত নিউট্রনেরও (Anti Neutron) সন্ধান পাওয়া গিয়েছে। বিভাট্রনের মধ্যে উৎপন্ন বিপরীত প্রোটন একটি বুদ্বুদ-কক্ষের (Bubble Chamber) প্রোপেনের (Propane) মধ্যে প্রোটনের সংগে এমনভাবে সংঘাত প্রাপ্ত হয় যে তাদের মধ্যে আধানের বিনিময় ( Exchange) ঘটে। এই সংঘাতের ফলে নিউট্রন ও বিপরীত নিউট্রন যুগল উৎপন্ন হয়। বিপরীত নিউট্রনটি অল্পদূর অগ্রসর হয়ে একটি কেন্দ্রকের মধ্যে নিউট্রনের সংগে বিক্রিয়ার ফলে বিনাশ প্রাপ্ত হয়। এর ফলে কেন্দ্রকটি বহুখণ্ডে বিখণ্ডিত হয়ে যায় এবং বেশ কয়েকটি $\pi$-মেসন, নিউক্লীয়ন প্রভৃতি নিঃসৃত হতে দেখা যায়। এর ফলে যে তারকাকৃতি ভ্রমণপথসমূহ উৎপন্ন হয় তাদের আলোকচিত্র এবং অন্যান্য পরীক্ষা থেকে বিপরীত নিউট্রনের অস্তিত্ব সার্বিকভাবে স্বীকৃত হয়েছে। এগুলির ভর নিউট্রনের ভরের সমান। এরা আধানহীন, এদের ঘূর্ণন $\frac{1}{2}$ এবং এদের চৌম্বক-ভ্রামক নিউট্রনের চৌম্বক-ভ্রামকের সমান ও বিপরীতমুখী।

বিপরীত প্রোটন এবং বিপরীত নিউট্রন আবিষ্কারের পরে বিজ্ঞানী মহলে অনেকে 'বিপরীত পরমাণুর' (Anti Atom) অস্তিত্ব কল্পনা করেন।

বিপরীত পরমাণুর কেন্দ্রক বিপরীত প্রোটন এবং বিপরীত নিউট্রন দ্বারা গঠিত হবে। কক্ষপথে পজিট্রন আবর্তন করবে। এমনও হতে পারে যে বিশাল বিশ্বজগতের কোন এক অঞ্চলের সমস্ত পদার্থই হয়ত এইরূপ বিপরীত পরমাণু দ্বারা গঠিত। অর্থাৎ সেখানকার সব পদার্থই প্রকৃতপক্ষে 'বিপরীত পদার্থ' (Anti Matter)। আমাদের জানা সাধারণ জগতের সাধারণ পদার্থের সম্মুখীন হলে এরা বিনাশ (Annihilation) প্রাপ্ত হবে। বর্তমানে এইরূপ বিপরীত পরমাণু বা বিপরীত পদার্থের অস্তিত্ব সম্পূর্ণ কল্পনা বিলাস মাত্র।

## 20·13 : মুখ্য মহাজাগতিক রশ্মির প্রকৃতি

অক্ষাংশের সংগে মহাজাগতিক রশ্মির তীব্রতা পরিবর্তন লক্ষ্য করে বোঝা যায় যে মুখ্য মহাজাগতিক রশ্মি আহিত কণিকার দ্বারা গঠিত। (20·4) অনুচ্ছেদে আলোচিত পূর্ব-পশ্চিম ক্রিয়া (East-West Effect) থেকে প্রতীয়মান হয় যে মুখ্য কণিকাগুলির আধান প্রধানতঃ ধনাত্মক। পৃথিবীর চৌম্বক ক্ষেত্র ভেদ করে এই সব কণিকার ভূপৃষ্ঠে আগমন থেকে বোঝা যায় যে এদের শক্তি খুবই উচ্চ। কণিকাগুলি প্রোটন হলে এদের ন্যূনতম শক্তি প্রায় $2·5 \times 10^{9}$ ই-ভো হওয়া প্রয়োজন। কণিকাগুলির মধ্যে যদি আরও ভারী পরমাণু কেন্দ্রক থাকে, তাহলে তাদের শক্তি উচ্চতর হওয়া প্রয়োজন।

মুখ্য মহাজাগতিক রশ্মির উপরোক্ত প্রকৃতি সম্বন্ধে সর্বপ্রথম প্রত্যক্ষ প্রমাণ সংগৃহীত হয় ১৯৪৮ সালে। ফ্রাইয়ের, লফ্‌গ্রেন, ন্যে, ওপেনহাইমার, ব্রাৎ এবং পীটার্‌স (Freier, Lofgren, Ney, Oppenheimer, Bradt and Peters) নামক বিজ্ঞানীগণ বেলুনের সাহায্যে সমুদ্রপৃষ্ঠ থেকে প্রায় 31,000 মিটার উর্ধ্বে কিছু কেন্দ্রকীয় অবদ্রব প্লেট এবং একটি ছোট সংখ্যায়ক নিয়ন্ত্রিত মেঘ-কক্ষ প্রেরণ করেন। অবদ্রবের তল উল্লম্ব (Vertical) ছিল। অবদ্রব প্লেট এবং মেঘ-কক্ষের সাহায্যে গৃহীত আলোকচিত্রগুলি ফিরে পাবার পরে সেগুলিকে বিকসিত করা হয়। কেন্দ্রকীয় অবদ্রব প্লেটের মধ্যে কতকগুলি অত্যন্ত স্থুল কণিকা ভ্রমণপথের নিদর্শন পাওয়া যায়। ভ্রমণপথগুলির আয়নন ঘনত্ব থেকে বোঝা যায় যে সেগুলি উচ্চশক্তি এবং উচ্চ $Z$ ( কেন্দ্রকীয় আধান ) সম্পন্ন পরমাণু কেন্দ্রকের দ্বারা সৃষ্ট। ভ্রমণপথগুলি থেকে দুইধারে কতকগুলি সরু এবং নাতিদীর্ঘ রেখাকৃতি গৌণ ভ্রমণপথ বেরিয়ে আসতে দেখা যায়। এগুলি হচ্ছে আপতিত মূল কণিকার

দ্বারা আয়ননের ফলে নিঃসৃত গৌণ ইলেকট্রনের ভ্রমণপথ ; অর্থাৎ এগুলি হচ্ছে δ-রশ্মি। মূল ভ্রমণপথের প্রতি একক দৈর্ঘ্যে বর্তমান δ- রশ্মির সংখ্যা নির্ভর করে কণিকাটির আধানের উপর। সুতরাং এই সংখ্যা নির্ণয় করে কণিকাটির আধান ($Z$) নিরূপণ করা যায়। এইরূপ পরিমাপ করে মুখ্য মহাজাগতিক রশ্মির মধ্যে $Z=1$ ( প্রোটন ) থেকে $Z=28$ পর্যন্ত পরমাণু কেন্দ্রকের নিদর্শন পাওয়া যায়। মেঘ-কক্ষ আলোকচিত্রের মধ্যেও উচ্চ আয়নন ক্ষমতা সম্পন্ন কণিকার নিদর্শন পাওয়া যায়। (20·18) চিত্রে কেন্দ্রকীয় অবদ্রবের মধ্যে উৎপন্ন একটি মুখ্য মহাজাগতিক কণিকার ভ্রমণপথের চিত্র প্রদর্শিত হয়েছে। পরে আরও অনেকে এই জাতীয় পরীক্ষা অনুষ্ঠিত করে $Z=40$ পর্যন্ত আধান সম্পন্ন কেন্দ্রকের সন্ধান পান।

এইসব পরীক্ষা থেকে প্রতীয়মান হয় যে মুখ্য মহাজাগতিক রশ্মি ইলেকট্রনের খোলস মুক্ত বিভিন্ন পরমাণু কেন্দ্রক দ্বারা গঠিত। এদের মধ্যে প্রোটনের প্রাচুর্য হচ্ছে সর্বাধিক ( প্রায় 89% )। এর পর হচ্ছে $\alpha$-কণিকা, অর্থাৎ হিলিয়াম কেন্দ্রকের প্রাচুর্য ( প্রায় 10% )। উচ্চতর $Z$ সম্পন্ন কেন্দ্রকের প্রাচুর্য ক্রমশঃ কম হতে থাকে। এদের মিলিত প্রাচুর্য মোট সংখ্যার 1% মত হয়।

নানারূপ পরীক্ষার দ্বারা মুখ্য মহাজাগতিক রশ্মির শক্তি সম্বন্ধেও কিছু কিছু তথ্য পাওয়া যায়। বায়ুমণ্ডলের বিভিন্ন স্তরে উৎপন্ন রশ্মিধারা (Shower) সম্পর্কিত পরীক্ষা থেকে এই সব ধারা উৎপাদক মহাজাগতিক রশ্মির শক্তি নিরূপণ করা যায়। সময়ে সময়ে বহু দূর বিস্তারী বায়বীয় রশ্মি-ধারা (Extensive Air Shower) উৎপন্ন হতে দেখা যায়। এই জাতীয় রশ্মিধারার মধ্যে প্রতি বর্গমিটারে 25 থেকে 50টি ধারা-কণিকা (Shower Particles) পাওয়া যায়। ধারা-কেন্দ্রে (Shower Core) কণিকা সংখ্যা আরও অনেক বেশী হয় ($10^4-10^5$)। এই সব কণিকার আগমনের সমকালীনত্ব সমাপতিত সংখ্যায়ক (Coincidence Counter) ব্যবস্থার সাহায্যে প্রমাণ করা যায়। অনুভূমিক তলে এই জাতীয় রশ্মিধারার বিস্তার কয়েক শত মিটার পর্যন্ত হতে দেখা যায়। এইরূপ কোন কোন পরীক্ষায় সমাপতন সংখ্যায়ক ব্যবহার করে কয়েক কিলোমিটার পর্যন্ত বিস্তারী রশ্মিধারার নিদর্শন পাওয়া যায়। ধারা মধ্যস্থ কণিকাসমূহের গড় শক্তি এবং মোট কণিকার সংখ্যা থেকে ধারা উৎপাদক অত্যুচ্চ শক্তি সম্পন্ন বিকিরণের শক্তি নিরূপণ করা যায়। এইসব পরিমাপ থেকে প্রতীয়মান হয় যে মুখ্য

Track as it entered stack of plates

Same track after 4.5 g/cm²

Same track after 9.2 g/cm²

চিত্র 20·18

মুখ্য মহাজাগতিক কণিকার ভ্রমণপথের আলোকচিত্র।

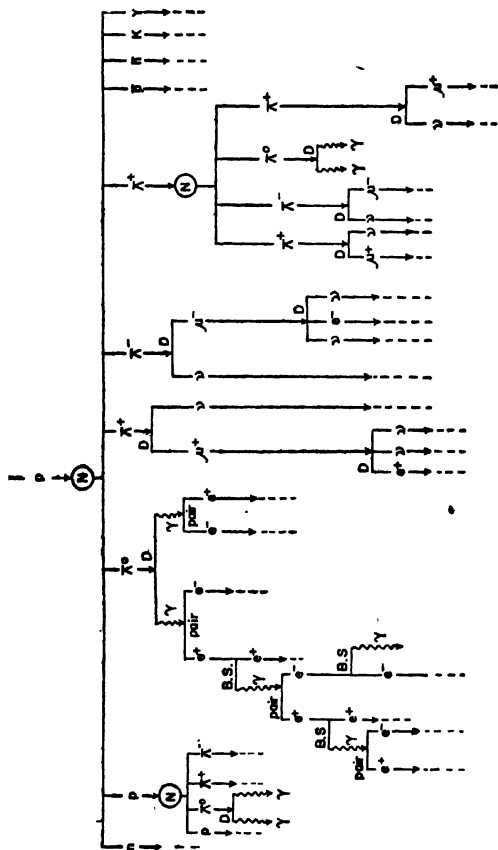
কণিকাগুলির শক্তি $10^9$ থেকে $10^{17}$ ই-ভো পর্যন্ত বিস্তৃত হয়। দূর-বিস্তারী বায়বীয় রশ্মিধারা সংক্রান্ত পরীক্ষা থেকে সময়ে সময়ে আরও উচ্চশক্তি কণিকার নিদর্শন পাওয়া যায়। সর্বোচ্চ শক্তি সম্পন্ন যে কণিকার নিদর্শন এ পর্যন্ত পাওয়া গেছে তার শক্তি হচ্ছে $6 \times 10^{19}$ ই-ভো অর্থাৎ প্রায় 10 জুল। এক কিলোগ্রাম ভরের কোন বস্তুকে এক মিটার ঊর্ধ্বে তুলতে প্রায় এই পরিমাণ শক্তির প্রয়োজন হয়। পরমাণবিক কোন কণিকার ক্ষেত্রে এইরূপ শক্তি প্রায় অভাবনীয়।

বায়ুমণ্ডলের ঊর্ধ্বতর স্তরে কেন্দ্রকীয় অবদ্রব প্লেট প্রেরণ করে যে সব চিত্র পাওয়া যায় তাদের মধ্যে কিছু কিছু তারকা (Star) সদৃশ চিত্রের নিদর্শন পাওয়া যায়। এইসব তারকা সদৃশ চিত্র উৎপন্ন হয় উচ্চশক্তি মহাজাগতিক রশ্মির সংঘাতের দ্বারা কেন্দ্রকগুলির বহুধা বিখণ্ডিত হয়ে যাওয়ার ফলে। এইরূপ বিখণ্ডনের ফলে কেন্দ্রক মধ্যস্থ নিউক্লীয়ন ছাড়াও বিভিন্ন প্রকার মেসন, হাইপেরন প্রভৃতি উৎপন্ন হয়। এদের পথসীমা (Range) পরিমাপ করে তারকা উৎপাদক রশ্মির শক্তি নির্ণয় করা যায়। এই পদ্ধতিতেও মহাজাগতিক রশ্মির শক্তি সম্বন্ধে অনেক প্রয়োজনীয় তথ্য পাওয়া যায়।

## 20·14: বায়ুমণ্ডলের মধ্যে মুখ্য মহাজাগতিক রশ্মির ক্রিয়া; গৌণ কণিকার উৎপত্তি

উচ্চশক্তি মহাজাগতিক রশ্মি বায়ুমণ্ডলে প্রবেশ করে নানারূপ বিক্রিয়া অনুষ্ঠিত করে, যার ফলে বিভিন্ন প্রকার গৌণ বিকিরণ (Secondary Radiation) উৎপন্ন হয়।

উচ্চশক্তি মুখ্য কণিকসমূহ প্রধানতঃ বায়ুমণ্ডলের ঊর্ধ্বাঞ্চলে পরমাণু কেন্দ্রকের সংগে সংঘাত লাভ করে শক্তিক্ষয় করে। এই জাতীয় সংঘাতের ফলে কেন্দ্রকগুলি বহুধা বিখণ্ডিত হয়ে যায়। উপরের আলোচনায় দেখা গেছে যে এই সময় এদের মধ্য থেকে নিউক্লীয়ন, $\pi$-মেসন এবং কোন কোন ক্ষেত্রে কিছু $K$-মেসন বা হাইপেরন নিঃসৃত হয়। বস্তুতঃ এই জাতীয় সংঘাতের ফলে $\pi$-মেসনের উৎপত্তিই হচ্ছে প্রধান ঘটনা। উৎপন্ন উচ্চশক্তি নিউক্লীয়নগুলি অন্যান্য কেন্দ্রকের সংগে সংঘাতের ফলে আরও $\pi$-মেসন সৃষ্টি করে।

এইভাবে উৎপন্ন $\pi$-মেসনগুলির মধ্যে স্বল্পাংশ বিভিন্ন পরমাণু কেন্দ্রকের সংগে বিক্রিয়া করে সেগুলিকে বিখণ্ডিত করে। বেশীর ভাগ উচ্চশক্তি আহিত $\pi$-মেসন ভ্রমণকালে বিঘটিত হয়ে $\mu$-মেসন সৃষ্টি করে। আধানহীন $\pi^0$

চিত্র 20·19

মুখ্য মহাজাগতিক কণিকা কর্তৃক বায়ুমণ্ডলে গৌণ কণিকা উৎপাদন। N কেন্দ্রকের সংগে $p$ মুখ্য কণিকার সংঘাতের ফলে নিউট্রন ($n$), প্রোটন ($p$), পাইয়ন ($\pi^+$, $\pi^-$, $\pi^0$), বিপরীত প্রোটন ও নিউট্রন ($\bar{p}$, $\bar{n}$), কে-মেসন ($K$), হাইপেরন ($Y$) প্রভৃতি গৌণ কণিকার উৎপত্তি হয়। D চিহ্ন দ্বারা বিভিন্ন কণিকার অবক্ষয়, B.S. চিহ্ন দ্বারা ব্রেমস্‌ট্রালুং পদ্ধতি ও Pair শব্দ দ্বারা যুগল উৎপাদন নির্দেশ করা হয়েছে। ভগ্নরেখা দ্বারা পরবর্তী স্তরে আরও বিক্রিয়া সংঘটনের সম্ভাব্যতা নির্দেশ করা হয়েছে। চিত্র থেকে প্রতীয়মান হয় যে সমুদ্রপৃষ্ঠে আগত আহিত কণিকাগুলি হচ্ছে প্রধানতঃ ইলেকট্রন, পজিট্রন ও $\mu$-মেসন।

মেসনগুলি উচ্চশক্তি γ-রশ্মি সৃষ্টি করে। অত্যুচ্চ বেগে ভ্রাম্যমাণ μ-মেসনগুলি সময়ের দীর্ঘসূত্রতার (Time Dilatation) জন্য অপেক্ষাকৃত দীর্ঘস্থায়ী হয় ( 20·9 অনুচ্ছেদ দ্রষ্টব্য )। সেইজন্য এবং উচ্চ ভেদ্যতা সম্পন্ন হওয়ার জন্য μ-মেসনগুলি বায়ুমণ্ডলের নিম্নতর স্তরে নেমে আসে। সমুদ্রপৃষ্ঠে প্রাপ্ত মহাজাগতিক রশ্মির উচ্চভেদী অংশ (Penetrating Component) গঠিত হয় প্রধানতঃ এই μ-মেসনগুলির দ্বারা।

μ-মেসনগুলির কিছু অংশ ভ্রমণকালে বিঘটিত হয়ে ইলেকট্রন বা পজিট্রন উৎপন্ন করে। এগুলি থেকে ব্রেমস্ট্রালুং এবং যুগল-উৎপাদন (Pair Creation) পদ্ধতিতে পরিবর্ধিত হয়ে যে রশ্মিধারা (Shower) উৎপন্ন হয় সেগুলিকেই প্রধানতঃ বায়ুমণ্ডলের নিম্নস্তরে স্বল্প-ভেদী অংশ (Soft Component) হিসাবে দেখা যায়।

অত্যুচ্চ শক্তিসম্পন্ন আধানহীন $\pi^{\circ}$ মেসনের বিঘটনের ফলে বায়ুমণ্ডলের অপেক্ষাকৃত ঊর্ধ্বাঞ্চলে যে খুব উচ্চশক্তি γ-রশ্মি উৎপন্ন হয়, সেগুলি 'দূর-বিস্তারী বায়বীয় রশ্মিধারা' (Extensive Air Shower) সৃষ্টি করে। এই ধারা মধ্যস্থ কণিকাগুলিও স্বল্পভেদী অংশের অন্তর্গত। (20·19) চিত্রে বায়ুমণ্ডলের মধ্যে মুখ্য মহাজাগতিক রশ্মির ক্রিয়ায় গৌণ কণিকা উৎপত্তির একটি চিত্ররূপ প্রদর্শিত হয়েছে।

এছাড়া বায়ুমণ্ডলের নীচের দিকে কিছু কিছু নিউট্রনও দেখা যায়। ঊর্ধ্বাঞ্চলে যে সব নিউক্লীয়ন সৃষ্ট হয় তারা পরে কেন্দ্রক বিঘটনের ফলে আরও নিউক্লীয়নের সৃষ্টি করে। এদের মধ্যে নিউট্রনগুলির কিছু অংশ বায়ুমণ্ডলের নিম্নস্তর পর্যন্ত নেমে আসতে সমর্থ হয়। উল্লেখযোগ্য যে এইসব নিউট্রনের সংগে সংঘাতের ফলে বায়ুমণ্ডলস্থ কিছু কিছু $N^{14}$ কেন্দ্রক রূপান্তরিত হয়ে অপেক্ষাকৃত দীর্ঘজীবী তেজস্ক্রিয় $C^{14}$ কেন্দ্রকের সৃষ্টি করে। এরই ফলে (17·14) অনুচ্ছেদে বর্ণিত লিবি (Libby) কর্তৃক উদ্ভাবিত তেজস্ক্রিয় কার্বন পদ্ধতিতে (Radio Carbon Method) বিভিন্ন প্রত্নতাত্ত্বিক বা নৃতাত্ত্বিক নিদর্শন বস্তুর বয়স নির্ণয় করা সম্ভব হয়।

### 20·15 ঃ মুখ্য মহাজাগতিক রশ্মির উৎপত্তি

মহাজাগতিক রশ্মির উৎপত্তি কোথায় এবং কী ভাবে হয় ? কী ভাবেই বা তারা বিপুল শক্তির অধিকারী হয় ? এই সব দুরূহ প্রশ্নের কোন সঠিক উত্তর দেওয়া সম্ভব নয়। তবে এ সম্বন্ধে কিছু অনুমান ভিত্তিক কল্পনা করা যেতে পারে।

মহাজাগতিক রশ্মি ভূপৃষ্ঠে সকল দিক থেকে এবং সব সময়ে সমান ধারায় আসতে থাকে। আপাতদৃষ্টিতে মনে হতে পারে যে যদি কণিকাগুলি মহাশূন্যে কোন নির্দিষ্ট স্থানে উৎপন্ন হয়, তাহলে সেগুলি প্রধানতঃ কোন কোন নির্দিষ্ট দিক থেকে এসে ভূপৃষ্ঠে আপতিত হবে। কিন্তু গভীর ভাবে বিবেচনা করলে প্রতীয়মান হয় যে তা নাও হতে পারে। আমরা জানি যে পৃথিবীকে বেষ্টন করে চৌম্বক ক্ষেত্র ক্রিয়া করে। এই চৌম্বক ক্ষেত্রের প্রভাবে আহিত মহাজাগতিক কণিকাসমূহ তাদের আগমনের আদিপথ থেকে বিচ্যুত হয়ে অন্য দিক থেকে এসে ভূপৃষ্ঠে আপতিত হয় বলে মনে হতে পারে। এমন কী কোন কোন ক্ষেত্রে সেগুলিকে আদিপথের বিপরীত দিক থেকে আগমনশীল বলে বোধ হতে পারে। সুতরাং মহাজাগতিক রশ্মি যে মহাশূন্যের কোন কোন নির্দিষ্ট অঞ্চলে উৎপন্ন হতে পারে এই ধারণা সম্পূর্ণ অমূলক নাও হতে পারে।

উপরোক্ত ধারণা যদি ঠিক হয়, তাহলে এই সব নির্দিষ্ট অঞ্চল কোথায় হতে পারে সে সম্বন্ধে কিছু কিছু অনুমান করা যেতে পারে। প্রথমেই মহাজাগতিক রশ্মির উৎস হিসাবে সূর্যের কথা বিবেচনা করা যাক। সূর্য থেকে মাঝে মাঝে বিপুল পরিমাণ আয়নিত গ্যাস নির্গত হবার কথা জানা আছে। এই ধরনের নির্গমনকে সৌর ক্রিয়া (Solar Activity) বলা হয়। সৌর ক্রিয়ার সময়ে পার্থিব চৌম্বক ক্ষেত্রের প্রভূত বিকৃতি ঘটে যার ফলে বেতার-সংকেত প্রেরণ এবং গ্রহণে বিশেষ বাধার সৃষ্টি হয়। তাছাড়া সৌর ক্রিয়ার প্রভাবে মহাজাগতিক রশ্মির তীব্রতার সবিশেষ পরিবর্তন লক্ষ্য করা যায়। সৌর ক্রিয়ার সময়ে সূর্যের কাছাকাছি চৌম্বক ক্ষেত্রের যে দ্রুত পরিবর্তন হয় তার প্রভাবে সূর্য থেকে নির্গত আহিত কণিকাসমূহ ( প্রধানতঃ প্রোটন ) উচ্চশক্তি অর্জন করে। এই ত্বরণ পদ্ধতি কতকটা বীটাট্রন যন্ত্রে ইলেকট্রন ত্বরণ পদ্ধতির অনুরূপ। এই সময়ে কণিকাগুলি কয়েকশত মি-ই-ভো, এমন কী সময়ে সময়ে কয়েক জি-ই-ভো ( $10^9$ ই-ভো ), পর্যন্ত শক্তি অর্জন করে। ভূপৃষ্ঠে আগত মহাজাগতিক রশ্মির কিছু অংশ অবশ্যই সূর্য থেকে এইভাবে নির্গত এবং ত্বরিত কণিকারাজির দ্বারা গঠিত হয়। কিন্তু স্পষ্টতঃ এর সবটাই সূর্য থেকে আগত কণিকার দ্বারা গঠিত হতে পারে না। কারণ উচ্চতর শক্তি ( $>10^{10}$ ই-ভো ) সম্পন্ন কণিকাগুলি সৌরমণ্ডলে বর্তমান ক্ষীণ চৌম্বক ক্ষেত্র ( $10^{-5}$ গাওস ) বা পার্থিব চৌম্বক ক্ষেত্র ( 0·5 গাওস ) দ্বারা বিশেষ বিচ্যুত হয় না। সুতরাং নিম্নশক্তি কণিকার মত এই সব কণিকার সকল দিক থেকে সমভাবে আগমন

বিবেচনা করলে সূর্যকে এগুলির উৎপত্তির কারণ হিসাব গ্রহণ করা সম্ভব হয় না। বস্তুতঃ সৌরমণ্ডলে বর্তমান চৌম্বক ক্ষেত্রের প্রভাবে $10^{14}$ ই-ভো অথবা উচ্চতর শক্তি সম্পন্ন কণিকাগুলির ভ্রমণপথের বক্রতা-ব্যাসার্ধ (Radius of Curvature) সৌরমণ্ডলের ব্যাসার্ধ অপেক্ষা সহস্র গুণ বা আরও বেশী হয়। ফলে এরা সূর্য থেকে উৎপন্ন কণিকা হলে, এগুলিকে প্রধানতঃ সূর্যের দিক থেকেই আসতে দেখা যেত।

এর পরে মহাজাগতিক রশ্মির উৎস হিসাবে বিভিন্ন নক্ষত্রের কথা বিবেচনা করা যেতে পারে। সব নক্ষত্রই যে সমভাবে এই রশ্মি নিঃসৃত করে এ কথা বিশ্বাস করা কঠিন। কারণ সেক্ষেত্রে, যেহেতু সূর্যও একটি নক্ষত্র এবং অন্যান্য নক্ষত্রের তুলনায় পৃথিবীর খুব কাছে অবস্থিত, সুতরাং ভূপৃষ্ঠে আপতিত মহাজাগতিক রশ্মির বেশীর ভাগই সূর্য থেকে পাওয়া যেত। উপরের আলোচনায় দেখা গেছে এই অনুমান সম্পূর্ণ ঠিক হতে পারে না।

সব নক্ষত্রই মহাজাগতিক রশ্মির উৎস না হলেও কোন কোন বিশেষ ধরনের নক্ষত্র থেকে যে এই রশ্মি নিঃসৃত হতে পারে এ কথা মনে করার কারণ আছে। জ্যোতির্বিদ্‌গণের জানা আছে যে কয়েকশত বৎসর পর পর কোন কোন নক্ষত্রের মধ্যে হঠাৎ প্রচণ্ড বিস্ফোরণ ঘটে। এই সময়ে নক্ষত্রটির সমগ্র-ভরের একটা বৃহৎ অংশ ( সূর্যের ভরের প্রায় দশ ভাগের এক ভাগ পরিমাণ ) নক্ষত্রদেহ থেকে প্রচণ্ড বেগে নিক্ষিপ্ত হয়, যার ফলে বিভিন্ন প্রকার পরমাণু কেন্দ্রকসমূহ অত্যুচ্চ শক্তি সহকারে নক্ষত্রটি থেকে বিভিন্ন দিকে নির্গত হয়ে আসে। এইরূপ বিস্ফোরণকে সুপার-নোভা (Super Nova) অ্যাখ্যা দেওয়া হয়। সুপার-নোভা বিস্ফোরণের সময়ে যে হারে শক্তি নিঃসৃত হয় ( $10^{40}-10^{41}$ আর্গ প্রতি সেকেণ্ডে ) তার সংগে আমাদের এই ছায়াপথের (Galaxy) মধ্যে বর্তমান মহাজাগতিক রশ্মি কর্তৃক বাহিত ক্ষমতার (Power) সংগতি পাওয়া যায়। এই শেষোক্ত ক্ষমতার পরিমাণ প্রায় $3\times10^{40}$ আর্গ প্রতি সেকেণ্ডে বলে অনুমান করা হয়। এই তথ্যের বলে অনুমান করা হয় যে সুপার-নোভা বিস্ফোরণের ফলে নিঃসৃত কণিকাসমূহই হচ্ছে মহাজাগতিক রশ্মির প্রধান উৎস।

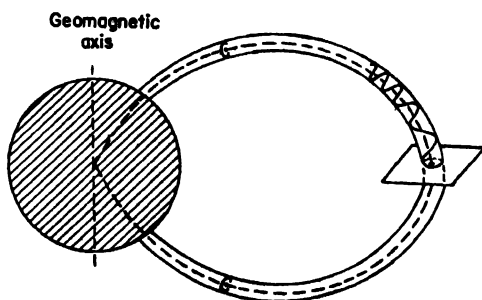
এখন প্রশ্ন হচ্ছে যে এই কণিকাগুলি কী উপায়ে এত উচ্চ শক্তি অর্জন করে। নানাবিধ জ্যোতিষ-শাস্ত্রীয় তথ্য থেকে এ সম্বন্ধে কিছুটা ধারণা করা যায়। পরিবর্তনশীল তাড়িৎচুম্বকীয় ক্ষেত্রের মধ্যে প্রোটন বা অন্যান্য ভারী আয়নের মত ইলেকট্রনগুলিও ত্বরিত হয়ে শক্তি অর্জন করে। ত্বরণের সময়ে

আহিত কণিকাগুলি সর্পিল পথে বিচরণ করে। তড়িৎচুম্বকীয় তত্ত্ব অনুযায়ী এইরূপ বক্রপথে বিচরণশীল ইলেকট্রনগুলি বিকিরণ নিঃসৃত করে। যেহেতু সিংক্রোট্রন (Synchrotron) যন্ত্রের মধ্যে আবর্তনশীল ইলেকট্রন কর্তৃক বিকিরণ নিঃসরণের সংগে এই প্রক্রিয়ার সাদৃশ্য আছে, সেইজন্য একে বলা হয় সিংক্রোট্রন-বিকিরণ (Synchrotron Radiation)। প্রোটন বা অন্যান্য ভারী কণিকার ক্ষেত্রে এইরূপ বিকিরণ নিঃসৃত হতে দেখা যায় না। দৃশ্যমান আলোক ছাড়াও এই বিকিরণের মধ্যে বেতার-তরঙ্গের নিদর্শন পাওয়া যায়। বেতার-দূরবীক্ষণের (Radio Telescope) সাহায্যে কর্কট নীহারিকা (Crab Nebula) নামক নীহারিকা থেকে এইরূপ বেতার-তরঙ্গ নিঃসরণের প্রমাণ পাওয়া যায়। এই নীহারিকাটি একটি সুপার-নোভা একথা নিশ্চিতভাবে জানা আছে। ১০৫৪ সালে চীনা জ্যোতির্বিদ্‌গণ এর বিস্ফোরণ দেখতে পান। এখনও এর আকৃতির কিছু কিছু পরিবর্তন লক্ষিত হয়। উপরোক্ত আলোচনা থেকে প্রতীয়মান হয় যে সুপার-নোভা বিস্ফোরণের সময়ে ইলেকট্রনগুলি পরিবর্তনশীল তড়িৎচুম্বকীয় ক্ষেত্রে শক্তি অর্জন করে। স্পষ্টতঃ একই কারণে বিস্ফোরণ কালে নিঃসৃত প্রোটন এবং অন্যান্য ভারী আহিত কণিকাও উচ্চশক্তি অর্জন করে। এই সমস্ত উচ্চশক্তি কণিকা নীহারিকা থেকে নির্গত হয়ে মহাজাগতিক রশ্মি সৃষ্টি করে।

প্রখ্যাত বিজ্ঞানী ফের্মি (Enrico Fermi) ১৯৪৯ সালে কণিকাগুলির ত্বরণ পদ্ধতি সম্বন্ধে অন্য এক তত্ত্ব উদ্‌ভাবিত করেন। মহাশূন্যে বহুস্থানে সুদূর-বিস্তারী ( 6 থেকে 8 আলোকবর্ষ ) আয়নিত গ্যাসের ( প্রধানতঃ হাইড্রোজেন ) মেঘ বিচরণ করে বলে জানা আছে। এই আয়নিত গ্যাসের মেঘের মধ্যে চৌম্বক ক্ষেত্রের অস্তিত্ব আছে বলে বিজ্ঞানীরা মনে করেন। যখন একটি প্রোটন এইরূপ একটি মেঘের উপরে বাইরে থেকে এসে আপতিত হয়ে প্রতিফলিত হয় তখন সেটি কিছুটা শক্তি অর্জন করে। এই সব মেঘের মধ্যেকার দূরত্ব আলোকবর্ষ পরিমাণ। সুতরাং প্রোটনগুলি বহু বৎসর পরপর একবার করে এইভাবে প্রতিফলিত হয়ে শক্তি অর্জন করে। দীর্ঘকাল ধরে বারবার এই ভাবে শক্তি অর্জন করে প্রোটনগুলি অবশেষে বিপুল শক্তির অধিকারী হয়। এখানে উল্লেখযোগ্য যে এই পদ্ধতিতে শক্তি অর্জন করতে হলে প্রোটনগুলির আদি শক্তি অন্ততঃ 200 মি-ই-ভো হওয়া প্রয়োজন। খুব সম্ভবতঃ সুপার-নোভা বিস্ফোরণ কালে প্রোটনগুলি এই আদিশক্তি পেয়ে থাকে। ফের্মি এই তত্ত্বের সাহায্যে মহাজাগতিক রশ্মির শক্তি বণ্টন

(Energy Distribution) প্রতিপন্ন করেন। পরিমিত শক্তি বণ্টনের সংগে এর সংগতি পাওয়া যায়।

## 20·16 : ভ্যান অ্যালেন বিকিরণ-বেষ্টনী

ভূপৃষ্ঠে আগত মহাজাগতিক রশ্মির মধ্যে $10^9$ ই-ভো অপেক্ষা নিম্নতর শক্তি সম্পন্ন কণিকা দেখা যায় না, এ কথা আগেই বলা হয়েছে। পৃথিবীর চৌম্বক ক্ষেত্রের প্রভাবে এরা বিচ্যুত হয়ে অন্য দিকে চলে যায়। সাম্প্রতিক কালে কিন্তু ভূপৃষ্ঠ থেকে কয়েক সহস্র কিলোমিটার ঊর্ধ্বে বিভিন্ন দূরত্বে কয়েক প্রকার অত্যুচ্চ তীব্রতা সম্পন্ন বিকিরণের সন্ধান পাওয়া গেছে, যাদের মধ্যে থাকে প্রধানতঃ অপেক্ষাকৃত অনেক কম শক্তি সম্পন্ন আহিত কণিকারাজি। এইসব কণিকা ভূপৃষ্ঠ থেকে কয়েক সহস্র কিলোমিটার ঊর্ধ্বে উত্তর ও দক্ষিণ গোলার্ধের নির্দিষ্ট অক্ষাংশের মধ্যে অবস্থিত অঞ্চলে আবদ্ধ হয়ে স্থায়ীভাবে বিচরণ করতে থাকে। ফলে এরা পৃথিবীকে বেষ্টন করে কতকগুলি বিকিরণ-বেষ্টনী (Radiation Belt) সৃষ্টি করে। ভ্যান অ্যালেন (Van Allen) নামক আমেরিকান বিজ্ঞানী রকেটের সাহায্যে গাইগার-মূলার সংখ্যায়ক প্রেরণ করে সর্বপ্রথম এইরূপ

চিত্র 20·20

ভ্যান অ্যালেন বেষ্টনীর মধ্যে আহিত কণিকার ভ্রমণপথ।

বিকিরণ-বেষ্টনীর সন্ধান পান। সেইজন্য এইরূপ বেষ্টনীকে বলা হয় 'ভ্যান-অ্যালেন বেষ্টনী'। ভূপৃষ্ঠ থেকে প্রায় 3200 কিমি এবং 16000 কিমি ঊর্ধ্বে এইরূপ দুটি বেষ্টনীর সন্ধান পাওয়া গেছে। এদের মধ্যে প্রধানতঃ প্রোটন ও ইলেকট্রন দেখতে পাওয়া যায়। ভিতরকার বেষ্টনীর মধ্যে প্রায় 100 মি-ই-ভো পর্যন্ত শক্তি সম্পন্ন প্রোটন দেখা যায়। বাইরের

বেষ্টনীর মধ্যে কয়েক সহস্র ই-ভো ইলেকট্রন এবং কয়েক মি-ই-ভো প্রোটন দেখা যায়। (20·20) চিত্রে বেষ্টনীর মধ্যে কণিকাগুলির ভ্রমণপথের নিদর্শন দেখান হয়েছে। কণিকাগুলি পৃথিবীর চৌম্বক বলরেখাসমূহ ধরে উত্তর থেকে দক্ষিণ এবং দক্ষিণ থেকে উত্তর গোলার্ধ পর্যন্ত বারবার সর্পিল (Spiral) পথে পরিভ্রমণ করে। পৃথিবীর চৌম্বক মেরুদ্বয়ের কাছাকাছি এসে কণিকাগুলি যখন অভিসারী (Converging) চৌম্বক ক্ষেত্রের সম্মুখীন হয় তখন তারা প্রতিফলিত হয়ে বিপরীতমুখী পথে পরিভ্রমণ করে। এই ভ্রমণপথগুলি পৃথিবীকে বেষ্টন করে থাকার ফলেই বিকিরণ-বেষ্টনীর সৃষ্টি হয়।

ভিতরের বেষ্টনীটি প্রধানতঃ ভূচুম্বকীয় বিষুব অঞ্চলে নিবদ্ধ থাকে। অপরপক্ষে বহির্বেষ্টনীটি উত্তর ও দক্ষিণ গোলার্ধের প্রায় 70° অক্ষাংশ পর্যন্ত বিস্তৃত থাকে। পৃথিবীর মেরুদ্বয়ের দিকে বেষ্টনীগুলির অস্তিত্ব থাকে না।

বেষ্টনীগুলি মধ্যস্থ কণিকাগুলি কীভাবে উৎপন্ন হয় সে সম্বন্ধে আমাদের ধারণা খুব স্পষ্ট নয়। ভিতরের বেষ্টনীর কণিকাগুলির উৎপত্তি হয় খুব সম্ভবতঃ মুখ্য মহাজাগতিক রশ্মির গৌণ ক্রিয়ার (Secondary Effect) ফলে। মুখ্য মহাজাগতিক রশ্মির সংঘাতে ঊর্ধ্বাকাশে যে সব নিউট্রনের সৃষ্টি হয় তাদের মধ্যে কিছু অংশ ভূপৃষ্ঠের দিকে না এসে উপরের দিকে চলে যায়। নিউট্রনগুলি অস্থায়ী হওয়ার জন্য ( $\tau = 12{\cdot}8$ মিনিট ) এরা অচিরেই বিঘটিত হয়ে প্রোটন ও ইলেকট্রনের সৃষ্টি করে। এই প্রোটন ও ইলেকট্রনগুলিই ভূচুম্বকীয় ক্ষেত্রে আবদ্ধ হয়ে ভিতরকার বেষ্টনী সৃষ্টি করে।

বহির্বেষ্টনীর কণিকাগুলির উৎপত্তি উপরোক্ত কারণে হয় কীনা বলা শক্ত। সৌর ক্রিয়ার দ্বারা এই বেষ্টনীস্থ বিকিরণের তীব্রতা বিশেষভাবে পরিবর্তিত হয়। এর থেকে মনে হয় সূর্যের প্রভাবেই এরা উৎপন্ন হয়। তবে এই বিকিরণের মধ্যে বর্তমান আহিত কণিকাগুলি সূর্য থেকে আগত, অথবা সৌর ক্রিয়ার দ্বারা ভূচুম্বকীয় ক্ষেত্রের দ্রুত পরিবর্তনের ফলে এরা বীটাট্রন প্রক্রিয়ায় শক্তি অর্জন করে এবং পৃথিবীর চৌম্বক ক্ষেত্রে আবদ্ধ হয়, তা সঠিকভাবে বোঝা যায় না।

যখন কোন মহাকাশ-যান এই বিকিরণ বেষ্টনীগুলি পার হয়ে যায়, তখন বাইরের বেষ্টনীতে পরিভ্রমণশীল উচ্চশক্তি ইলেকট্রনগুলি এইসব যানের উপরে আপতিত হয়ে প্রচুর X-রশ্মি উৎপন্ন করে। এই রশ্মির প্রভাবে মহাকাশচারীগণ যাতে ক্ষতিগ্রস্ত না হন সেজন্য যথোপযুক্ত ব্যবস্থা গ্রহণ করা হয়।

বহির্বেষ্টনীতে পরিভ্রমণরত ইলেকট্রনগুলি মাঝে মাঝে বায়ুমণ্ডলের খুব উচ্চস্তরের অণুগুলির সংগে সংঘাত লাভ করে নিম্নতর স্তরে নেমে আসতে পারে। সৌর ক্রিয়ার (Solar Activity) সময়ে পৃথিবীর চৌম্বক ক্ষেত্রের যে বিকৃতি ঘটে তার ফলেও এইরূপ ঘটতে পারে। এই ইলেকট্রনগুলি ঊর্ধ্বাকাশে বায়বীয় অণুগুলিকে সংঘাতের দ্বারা আয়নিত বা উত্তেজিত করে, যার ফলে আলোক নিঃসৃত হয়। এই আলোকই হচ্ছে মেরু অঞ্চলে দৃষ্ট মেরু-জ্যোতি (Aurora Borealis)।

## পরিশিষ্ট A-1

# হাইড্রোজেন সদৃশ পরমাণুর উপবৃত্তাকার কক্ষপথে আবর্তনশীল ইলেকট্রনের শক্তি

(3·11) অনুচ্ছেদে সমারফেল্ড-উইলসন কোয়ানটাম শর্ত সম্বন্ধে আলোচনা করা হয়েছে। উপবৃত্তাকার কক্ষপথে আবর্তনশীল ইলেকট্রনের ক্ষেত্রে দুটি কোয়ানটাম শর্ত পাওয়া যায়। (3·29) এবং (3·30) সমীকরণ অনুযায়ী এই দুটি শর্ত হচ্ছে

$$\oint p_r \, dr = n_r h \qquad \text{(A1·1)}$$

$$\oint p_\theta d\theta = kh \qquad \text{(A1·2)}$$

এখানে $r$ এবং $p_r$ হচ্ছে যথাক্রমে ইলেকট্রনের কৈন্দ্রিক (Radial) স্থানাংক এবং কৈন্দ্রিক ভরবেগ ; $\theta$ এবং $p_\theta$ হচ্ছে যথাক্রমে কৌণিক স্থানাংক ও কৌণিক ভরবেগ। $n_r$ ও $k$ হচ্ছে যথাক্রমে কৈন্দ্রিক এবং কক্ষীয় (Orbital) কোয়ানটাম সংখ্যা।

সনাতন বলবিদ্যা অনুযায়ী কেন্দ্রাভিমুখী বলের (Central Force) দ্বারা প্রভাবান্বিত গতিশীল কণিকার কৌণিক ভরবেগ ধ্রুবক হয়। সুতরাং উপবৃত্তাকার কক্ষপথে আবর্তনশীল ইলেকট্রনের ও কৌণিক ভরবেগ $p_\theta$ ধ্রুবক হবে (3·11 অনুচ্ছেদ দ্রষ্টব্য)। সুতরাং (A1·2) সমীকরণ থেকে পাওয়া যায় $2\pi p_\theta = kh$ ; অর্থাৎ

$$p_\theta = kh/2\pi \qquad \text{(A1·3)}$$

যেহেতু $\dot{r} = dr/dt$ হচ্ছে কৈন্দ্রিক বেগ (Radial Velocity), অতএব কৈন্দ্রিক ভরবেগ হবে

$$p_r = m\dot{r} = m\frac{dr}{d\theta}\cdot\frac{d\theta}{dt} = mr^2\theta\left(\frac{1}{r^2}\frac{dr}{d\theta}\right) = \frac{p_\theta}{r^2}\frac{dr}{d\theta} \qquad \text{(A1·4)}$$

এখানে ধরে নেওয়া হয়েছে যে উপবৃত্তাকার কক্ষপথে আবর্তনরত ইলেকট্রনের কৈন্দ্রিক স্থানাংক ($r$) এর কৌণিক স্থানাংকের ($\theta$) অপেক্ষক (Function)। সমীকরণ (A1·1) এবং থেকে পাওয়া যায়

$$n_r h = \oint p_r \; dr = \oint \frac{p_\theta}{r^2}\frac{dr}{d\theta}\cdot\frac{dr}{d\theta}\, d\theta = p_\theta \oint \left(\frac{1}{r}\frac{dr}{d\theta}\right)^2 d\theta \qquad \text{(A1·5)}$$

যেহেতু $p_\theta$ একটি ধ্রুবক, অতএব (A 1·5) সমীকরণে এই সংখ্যাটিকে সমাকলন চিহ্নের বাইরে রাখা হয়েছে।

স্থানাংক-জ্যামিতির (Coordinate Geometry) সূত্র অনুযায়ী উপবৃত্তের ক্ষেত্রে $r$ এবং $\theta$ স্থানাংকদ্বয়ের মধ্যে নিম্নলিখিত গাণিতিক সম্পর্ক পাওয়া যায়ঃ

$$r=\frac{a(1-\varepsilon^2)}{1+\varepsilon\cos\theta} \tag{A1·6}$$

এখানে ε হচ্ছে উপবৃত্তটির উৎকেন্দ্রতা (Eccentricity) এবং $a$ হচ্ছে এর অর্ধ-পরাক্ষ (Semi Major Axis)। (A1·6) সমীকরণ থেকে আমরা পাই

$$\frac{dr}{d\theta}=\frac{a(1-\varepsilon^2)\varepsilon\sin\theta}{(1+\varepsilon\cos\theta)^2}$$

অতএব $$\frac{1}{r}\frac{dr}{d\theta}=\frac{\varepsilon\sin\theta}{1+\varepsilon\cos\theta} \tag{A1·7}$$

সমীকরণ (A1·5) থেকে পাওয়া যায়

$$n_r h=p_\theta\oint\frac{\varepsilon^2\sin^2\theta}{(1+\varepsilon\cos\theta)}$$

যদি আমরা লিখি

$$I=\oint\frac{\varepsilon^2\sin^2\theta\,d\theta}{(1+\varepsilon\cos\theta)^2}=\oint u\,dv$$

এবং যদি লেখা যায়

$$u=\varepsilon\sin\theta,\ dv=\frac{\varepsilon\sin\theta d\theta}{(1+\varepsilon\cos\theta)^2}$$

তাহলে আমরা পাই

$$du=\varepsilon\cos\theta\,d\theta \text{ এবং } v=\frac{1}{1+\varepsilon\cos\theta}$$

অতএব অংশানুক্রমে সমাকলন (Integration by Parts) করে পাওয়া যায়

$$I=uv\Big]_0^{2\pi}-\oint v\,du$$

$$=\frac{\varepsilon \sin\theta}{1+\varepsilon\cos\theta}\Big]_0^{2\pi}-\int_0^{2\pi}\frac{\varepsilon\cos\theta\, d\theta}{1+\varepsilon\cos\theta}$$

$$=\int_0^{2\pi}\left(\frac{1}{1+\varepsilon\cos\theta}-1\right)d\theta=2\pi\left(\frac{1}{\sqrt{1-\varepsilon^2}}-1\right)$$

প্রথম সমাকলনটির মান যে কোন প্রামাণ্য সমাকলন-সারণী থেকে পাওয়া যায়। অতএব আমরা পাই

$$n_r h=2\pi p_\theta\left(\frac{1}{\sqrt{1-\varepsilon^2}}-1\right)$$

সুতরাং (A1·3) সমীকরণের সাহায্যে আমরা পাই

$$\frac{1}{\sqrt{1-\varepsilon^2}}=1+\frac{n_r}{k}=\frac{k+n_r}{k}=\frac{n}{k}\ (\text{ধরা যাক}) \qquad (A1·8)$$

যেহেতু $n_r$ এবং $k$ হচ্ছে দুটি পূর্ণসংখ্যা, অতএব এদের সমষ্টি $n=n_r+k$ সংখ্যাটিও একটি পূর্ণসংখ্যা হবে।

যদি $a$ এবং $b$ যথাক্রমে উপবৃত্তের অর্ধ-পরাক্ষ এবং অর্ধ-উপাক্ষ (Semi Minor Axis) নির্দেশ করে, তাহলে স্থানাংক-জ্যামিতির সূত্র থেকে পাওয়া যায়

$$b=a\sqrt{1-\varepsilon^2}$$

সুতরাং আমরা পাই

$$\frac{b}{a}=\sqrt{1-\varepsilon^2}=\frac{k}{n} \qquad (A1·9)$$

যেহেতু $b<a$ হয়, অতএব $k<n$ হবে। বৃত্তাকার কক্ষপথের ক্ষেত্রে উৎকেন্দ্রতা $\varepsilon=0$ হয় এবং $b=a$ হয়। অতএব এক্ষেত্রে $k=n$ হয়; অর্থাৎ কক্ষীয় কোয়ানটাম সংখ্যার বৃহত্তম মান $n$ হয়। স্পষ্টতঃ এক্ষেত্রে কৈন্দ্রিক কোয়ানটাম সংখ্যা $n_r=0$ হয়। আবার কক্ষীয় কোয়ানটাম সংখ্যা $k$ সব সময় একটি পূর্ণসংখ্যা হয়। এর ন্যূনতম মান $k=1$ হবে। কারণ $k=0$ হলে ইলেকট্রনের কৌণিক ভরবেগ $p_\theta=0$ হবে। অর্থাৎ ইলেকট্রনটির কক্ষপথ তখন উপবৃত্তাকার না হয়ে রৈখিক হবে এবং ইলেকট্রনটি সরল সমঞ্জস গতিতে কেন্দ্রকের মধ্য দিয়ে যাতায়াত করবে। যেহেতু এইরূপ

ঘটা অসম্ভব সুতরাং আমাদের ধরে নিতে হবে যে $k=0$ হতে পারে না এবং এর ন্যূনতম মান $k=1$ হবে। অর্থাৎ কক্ষীয় কোয়ানটাম সংখ্যার সম্ভাব্য মানগুলি হবে

$$k=1, 2, 3, \cdots\cdots n$$

যেহেতু $n_r+k=n$, অতএব কৈন্দ্রিক কোয়ানটাম সংখ্যার সম্ভাব্য মানসমূহ হবে

$$n_r=(n-1), (n-2), \cdots\cdots 0$$

উপবৃত্তাকার কক্ষপথে আবর্তনশীল ইলেকট্রনের মোট শক্তি $E$ হচ্ছে এর গতিশক্তি $E_k$ এবং স্থিতিশক্তি $V$ এর সমষ্টির সমান। স্পষ্টতঃ

$$E=E_k+V=\frac{p_r^2}{2m}+\frac{p_\theta^2}{2mr^2}-\frac{Ze^2}{r}$$

এখানে $m$ হচ্ছে ইলেকট্রনের ভর এবং $Ze$ হচ্ছে কেন্দ্রকের আধান। (A1·4) সমীকরণের সাহায্যে পাওয়া যায়

$$E=\frac{p_\theta^2}{2mr^2}\left[\left(\frac{1}{r}\frac{dr}{d\theta}\right)^2+1\right]-\frac{Ze^2}{r}$$

উপরের সমীকরণ থেকে পাওয়া যায়

$$\left(\frac{1}{r}\frac{dr}{d\theta}\right)^2=\frac{2mE}{p_\theta^2}\cdot r^2+\frac{2mZe^2}{p_\theta^2}\cdot r-1 \qquad \text{(A1·10)}$$

আবার (A1·6) সমীকরণ থেকে পাওয়া যায়

$$1+\varepsilon\cos\theta=\frac{a(1-\varepsilon^2)}{r}$$

এর থেকে আমরা পাই

$$\varepsilon^2\sin^2\theta=\varepsilon^2-\varepsilon^2\cos^2\theta$$
$$=\varepsilon^2-\left\{\frac{a(1-\varepsilon^2)}{r}-1\right\}^2$$
$$=(\varepsilon^2-1)-\frac{a^2(1-\varepsilon^2)^2}{r^2}+\frac{2a(1-\varepsilon^2)}{r}$$

সুতরাং (A1·7) সমীকরণ থেকে পাওয়া যায়

$$\left(\frac{1}{r}\frac{dr}{d\theta}\right)^2=\frac{\varepsilon^2\sin^2\theta}{(1+\varepsilon\cos\theta)^2}$$

$$=\frac{r^2}{a^2(1-\varepsilon^2)^2}\left\{(\varepsilon^2-1)-\frac{a^2(1-\varepsilon^2)^2}{r^2}+\frac{2a(1-\varepsilon^2)}{r}\right\}$$

$$=-\frac{r^2}{a^2(1-\varepsilon^2)}+\frac{2r}{a(1-\varepsilon^2)}-1 \qquad \text{(A1·11)}$$

যেহেতু (A1·10) এবং (A1·11) সমীকরণ দুটি উপবৃত্তের উপরকার $r$ এর যে কোন মানের ক্ষেত্রে প্রযোজ্য, অতএব এই দুই সমীকরণে $r$ এর বিভিন্ন ঘাত (Power) সম্পন্ন পদগুলির গুণাংকসমূহ পরস্পরের সমান হবে। সুতরাং আমরা পাই

$$\frac{2mE}{p_\theta^2}=-\frac{1}{a^2(1-\varepsilon^2)} \qquad \text{(A1·12)}$$

$$\frac{2mZe^2}{p_\theta^2}=\frac{2}{a(1-\varepsilon^2)} \qquad \text{(A1·13)}$$

(A1·12) এবং (A1·13) সমীকরণদ্বয় থেকে পাওয়া যায়

$$\frac{E}{Ze^2}=-\frac{1}{2a}$$

অর্থাৎ $\quad E=-Ze^2/2a$

আবার (A1·13) সমীকরণ থেকে পাওয়া যায়

$$a=\frac{p_\theta^2}{mZe^2(1-\varepsilon^2)}$$

অতএব (A1·3) এবং (A1·9) সমীকরণ দুটির সাহায্যে আমরা পাই ($\because \; p_\theta=kh/2\pi$),

$$a=\frac{k^2h^2}{4\pi^2}\cdot\frac{1}{mZe^2}\cdot\frac{n^2}{k^2}=\frac{n^2h^2}{4\pi^2mZe^2} \qquad \text{(A1·14)}$$

এবং

$$E=-\frac{2\pi^2mZ^2e^4}{n^2h^2} \qquad \text{(A1·15)}$$

## পরিশিষ্ট A-2

# কণিকা তরঙ্গের তরঙ্গদৈর্ঘ্য

(7·6) অনুচ্ছেদে কণিকা তরঙ্গের ক্ষেত্রে তরঙ্গদৈর্ঘ্য $\lambda = h/p$ এই সূত্রটি প্রযোজ্য এই অনুমানের ভিত্তিতে প্রমাণ করা হয় যে কণিকার বেগ $v$ এবং কণিকা তরঙ্গের গুচ্ছবেগ $w$ পরস্পরের সমান। দ্য ব্রয় কিন্তু তাঁর তত্ত্বে উপরোক্ত সিদ্ধান্তকে অনুমান করে বিপরীতমুখী যুক্তির সাহায্যে প্রমাণ করেন যে কণিকা তরঙ্গের তরঙ্গদৈর্ঘ্য $\lambda = h/p$ হয়। বর্তমান পরিশিষ্টে এই সম্পর্কটি প্রতিপন্ন করা হবে।

(7·6) অনুচ্ছেদ থেকে $\lambda$ তরঙ্গদৈর্ঘ্য এবং $\nu$ কম্পাংক সম্পন্ন কোন তরঙ্গের দশাবেগ (Phase Velocity) $u$ এবং গুচ্ছবেগ (Group Velocity) $w$ পাওয়া যায় যথাক্রমে

$$u = \nu\lambda = \nu/\tau$$

$$w = \frac{d\nu}{d\tau} = \frac{d}{d\tau}(u\tau) = u + \tau\frac{du}{d\tau}$$

এখানে $\tau = 1/\lambda$ হচ্ছে তরঙ্গ-সংখ্যা (Wave Number)।

দ্য ব্রয় অনুমান করেন যে ফোটনের ক্ষেত্রে প্রযোজ্য শক্তিসূত্র $E = h\nu$ কণিকার ক্ষেত্রেও প্রয়োগ করা যায়। অর্থাৎ কণিকার মোট শক্তি লেখা যায়

$$E = \frac{m_0 c^2}{\sqrt{1-\beta^2}} = h\nu$$

সুতরাং
$$\nu = \frac{m_0 c^2}{h\sqrt{1-\beta^2}}$$

এবং
$$u = \nu\lambda = \frac{\nu}{\tau} = \frac{m_0 c^2}{h\tau\sqrt{1-\beta^2}}$$

অবকলন করে পাওয়া যায়

$$\frac{du}{d\tau} = -\frac{m_0 c^2}{h\tau^2\sqrt{1-\beta^2}} + \frac{m_0 c^2 \beta}{h\tau(1-\beta^2)^{3/2}} \cdot \frac{d\beta}{d\tau}$$

যদি অনুমান করা যায় যে কণিকা তরঙ্গের গুচ্ছবেগ $w$ কণিকার বেগ $v$ এর সমান, তাহলে আমরা পাই

$$v = w = u + \tau \frac{du}{d\tau}$$

$$= \frac{m_0 c^2}{h\tau\sqrt{1-\beta^2}} - \frac{m_0 c^2}{h\tau\sqrt{1-\beta^2}} + \frac{m_0 c^2 \beta}{h(1-\beta^2)^{3/2}} \cdot \frac{d\beta}{d\tau}$$

অতএব $$v = \beta c = \frac{m_0 c^2 \beta}{h(1-\beta^2)^{3/2}} \frac{d\beta}{d\tau}$$

এর থেকে পাওয়া যায় $$d\tau = \frac{m_0 c}{h} \frac{d\beta}{(1-\beta^2)^{3/2}}$$

উপরের সমীকরণকে সমাকলন করে পাওয়া যায়

$$\tau = \frac{1}{\lambda} = \frac{m_0 c}{h} \frac{\beta}{\sqrt{1-\beta^2}} + \text{ধ্রুবক}$$

যখন $\beta = 0$ হয়, অর্থাৎ কণিকাটির বেগ $v = 0$ হয়, তখন যদি $\lambda = \infty$ হয়, তাহলে উপরের সমীকরণের ধ্রুবক $= 0$ হয়। অতএব আমরা পাই

$$\frac{1}{\lambda} = \frac{m_0 \beta c}{h\sqrt{1-\beta^2}} = \frac{m_0 v}{h\sqrt{1-\beta^2}} = \frac{mv}{h} = \frac{p}{h}$$

সুতরাং $$\lambda = \frac{h}{p}$$

## পরিশিষ্ট A-3

# কতকগুলি প্রয়োজনীয় সার্বিক ধ্রুবকের তালিকা

| | | |
|---|---|---|
| আলোকের গতিবেগ | $c$ | $2{\cdot}997929 \times 10^{10}$ সেমি / সেকেণ্ডে |
| ইলেকট্রনীয় আধান | $e$ | $4{\cdot}80288 \times 10^{-10}$ $esu$ |
| অ্যাভোগেড্রো সংখ্যা | $N_0$ | $6{\cdot}02472 \times 10^{23}$ পরমাণু / গ্রাম-পরমাণু |
| ফ্যারাডে | $F$ | $9652{\cdot}01$ $emu$ / গ্রাম-অণু |
| ইলেকট্রনের আপেক্ষিক আধান | $e/m_e$ | $1{\cdot}75888 \times 10^{7}$ $emu$ / গ্রাম |
| প্ল্যাংক ধ্রুবক | $h$ | $6{\cdot}6252 \times 10^{-27}$ আর্গ-সেকেণ্ড |
| অসীম ভরের ক্ষেত্রে রিডবার্গ ধ্রুবক | $R_\infty$ | $109{,}737{\cdot}309$ সেমি$^{-1}$ |
| ইলেকট্রনের স্থির ভর | $m_e$ | $9{\cdot}1085 \times 10^{-28}$ গ্রাম |
| ইলেকট্রনের স্থির ভর-শক্তি | $m_e c^2$ | $0{\cdot}511$ মি-ই-ভো |
| বোর ম্যাগনেটন | $\mu_B$ | $9{\cdot}2732 \times 10^{-21}$ আর্গ / গাওস |
| প্রোটন-ইলেকট্রন ভরানুপাত | $\frac{M_p}{m_e}$ | 1836 |
| পরমাণবিক ভরের একক | $M_0$ | $1{\cdot}660 \times 10^{-24}$ গ্রাম |
| পরমাণবিক ভরের এককের সমতুল শক্তি | $M_0 c^2$ | $931{\cdot}162$ মি-ই-ভো |
| বোলৎসমান ধ্রুবক | $k$ | $1{\cdot}38042 \times 10^{-16}$ আর্গ / ডিগ্রী C |
| ইলেকট্রন ভোল্টের মান | | $1{\cdot}60207 \times 10^{-12}$ আর্গ |

# পরিশিষ্ট A-4

## মৌলসমূহের পর্যায় সারণী

| গ্রুপ / পর্যায় | I | II | III | IV | V | VI | VII | VIII |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 1 H | | | | | | | 2 He |
| 2 | 3 Li | 4 Be | 5 B | 6 C | 7 N | 8 O | 9 F | 10 Ne |
| 3 | 11 Na | 12 Mg | 13 Al | 14 Si | 15 P | 16 S | 17 Cl | 18 A |
| 4 | 19 K<br>29 Cu | 20 Ca<br>30 Zn | 21 Sc<br>31 Ga | 22 Ti<br>32 Ge | 23 V<br>33 As | 24 Cr<br>34 Si | 25 Mn<br>35 Br | 26 Fe 27 Co 28 Ni<br>36 Kr |
| 5 | 37 Rb<br>47 Ag | 38 Sr<br>48 Cd | 39 Y<br>49 In | 40 Zr<br>50 Sn | 41 Nb<br>51 Sb | 42 Mo<br>52 Te | 43 Te<br>53 I | 44 Ru 45 Rh 46 Pd<br>54 Xe |
| 6 | 55 Cs<br>79 Au | 56 Ba<br>80 Hg | 57 La*<br>81 Tl | 72 Hf<br>82 Pb | 73 Ta<br>83 Bi | 74 W<br>84 Po | 75 Re<br>85 At | 76 Os 77 Ir 78 Pt<br>86 Rn |
| 7 | 87 Fr | 88 Ra | 89 Ac§ | 104 Ku | 105 Ha | | | |

* নিম্নের তালিকাভুক্ত মৌলসমূহ $Z=57$ ল্যানথানাম থেকে $Z=72$ হ্যাফনিয়ামের মধ্যে অবস্থিত থাকবে :

| ল্যানথানাইড শ্রেণী (বিরল মৃত্তিকা মৌলসমূহ) | 58 | 59 | 60 | 61 | 62 | 63 | 64 | 65 | 66 | 67 | 68 | 69 | 70 | 71 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Ce | Pr | Nd | Pm | Sm | Eu | Gd | Tb | Dy | Ho | Er | Tm | Nb | Lu |

§ নিম্নের তালিকাভুক্ত মৌলসমূহ $Z=89$ অ্যাকটিনিয়াম থেকে $Z=104$ কুর্চাটোভিয়ামের মধ্যে অবস্থিত থাকবে :

| অ্যাকটিনাইড শ্রেণী | 90 | 91 | 92 | 93 | 94 | 95 | 96 | 97 | 98 | 99 | 100 | 101 | 102 | 103 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Th | Pa | U | Np | Pu | Am | Cm | Bk | Cf | E | Fm | Mv | No | Lw |

## পরিশিষ্ট—A-5

# স্থায়ী আইসোটোপসমূহের তালিকা ও ধর্মাবলী

| মৌল | $Z$ | $A$ | আপেক্ষিক প্রাচুর্য (%) | পরমাণবিক ভর |
|---|---|---|---|---|
| H | 1 | 1 | 99·985 | 1·008146 |
| | | 2 | 0·015 | 2·014741 |
| He | 2 | 3 | $1·3 \times 10^{-4}$ | 3·016977 |
| | | 4 | ~100 | 4·003879 |
| Li | 3 | 6 | 7·42 | 6·017021 |
| | | 7 | 92·58 | 7·018223 |
| Be | 4 | 9 | 100 | 9·015043 |
| B | 5 | 10 | 18·98 | 10·016114 |
| | | 11 | 81·02 | 11·01280 |
| C | 6 | 12 | 98·892 | 12·003842 |
| | | 13 | 1·108 | 13·00750 |
| N | 7 | 14 | 99·635 | 14·00755 |
| | | 15 | 0·365 | 15·00490 |
| O | 8 | 16 | 99·759 | 16·00000 |
| | | 17 | 0·037 | 17·00453 |
| | | 18 | 0·204 | 18·00488 |
| F | 9 | 19 | 100 | 19·00444 |
| Ne | 10 | 20 | 90·92 | 19·99877 |
| | | 21 | 0·257 | 21·0005 |
| | | 22 | 8·82 | 21·99838 |
| Na | 11 | 23 | 100 | 23·00177 |
| Mg | 12 | 24 | 78·60 | 23·99268 |
| | | 25 | 10·11 | 24·99375 |
| | | 26 | 11·29 | 25·99080 |
| Al | 13 | 27 | 100 | 26·99001 |
| Si | 14 | 28 | 92·18 | 27·98582 |
| | | 29 | 4·71 | 28·98570 |
| | | 30 | 3·12 | 29·98331 |
| P | 15 | 31 | 100 | 30·98362 |
| S | 16 | 32 | 95·018 | 31·98224 |
| | | 33 | 0·750 | 32·98213 |

| মৌল | $Z$ | $A$ | আপেক্ষিক প্রাচুর্য (%) | পরমাণবিক ভর |
|---|---|---|---|---|
| | | 34 | 4·215 | 33·97873 |
| | | 36 | 0·017 | 35·97893 |
| Cl | 17 | 35 | 75·53 | 34·98006 |
| | | 37 | 24·47 | 36·97767 |
| A | 18 | 36 | 0·337 | 36·97900 |
| | | 38 | 0·063 | 37·97491 |
| | | 40 | 99·6 | 39·97515 |
| K | 19 | 39 | 93·08 | 38·97606 |
| | | 40§ | 0·012 | 39·97654 |
| | | 41 | 6·91 | 40·97490 |
| Ca | 20 | 40 | 96·97 | 39·97545 |
| | | 42 | 0·64 | 41·97216 |
| | | 43 | 0·145 | 42·97251 |
| | | 44 | 2·06 | 43·96924 |
| | | 46 | 0·0033 | .... |
| | | 48 | ·185 | 47·96778 |
| Sc | 21 | 45 | 100 | 44·97010 |
| Ti | 22 | 46 | 7·95 | 45·96697 |
| | | 47 | 7·75 | 46·96668 |
| | | 48 | 73·45 | 47·96317 |
| | | 49 | 5·51 | 48·96358 |
| | | 50 | 5·34 | 49·96077 |
| V | 23 | 50§ | 0·24 | 49·96215 |
| | | 51 | 99·76 | 50·96052 |
| Cr | 24 | 50 | 4·31 | 49·96210 |
| | | 52 | 83·76 | 51·95693 |
| | | 53 | 9·55 | 52·95772 |
| | | 54 | 2·38 | 53·9563 |
| Mn | 25 | 55 | 100 | 54·95581 |
| Fe | 26 | 54 | 5·48 | 53·95704 |
| | | 56 | 91·68 | 55·95272 |
| | | 57 | 2·17 | 56·95365 |
| | | 58 | 0·31 | 57·9520 |

বিঃ দ্রঃ। § চিহ্নিত মৌলগুলি অস্থায়ী।

| মৌল | Z | A | আপেক্ষিক প্রাচুর্য (%) | পরমাণবিক ভর |
|---|---|---|---|---|
| Co | 27 | 59 | 100 | 58·95182 |
| Ni | 28 | 58 | 67·76 | 57·95345 |
| | | 60 | 26·16 | 59·94901 |
| | | 61 | 1·25 | 60·94907 |
| | | 62 | 3·66 | .... |
| | | 64 | 1·16 | 63·94755 |
| Cu | 29 | 63 | 69·1 | 62·94926 |
| | | 65 | 30·9 | 64·94835 |
| Zn | 30 | 64 | 48·89 | 63·94955 |
| | | 66 | 27·81 | 65·94722 |
| | | 67 | 4·11 | 66·94815 |
| | | 68 | 18·56 | 67·94686 |
| | | 70 | 0·62 | 69·94779 |
| Ga | 31 | 69 | 60·2 | 68·9476 |
| | | 71 | 39·2 | 70·9474 |
| Ge | 32 | 70 | 20·55 | 69·9447 |
| | | 72 | 27·37 | .... |
| | | 73 | 7·67 | .... |
| | | 74 | 36·74 | 73·9439 |
| | | 76 | 7·67 | 75·9433 |
| As | 33 | 75 | 100 | 74·9432 |
| Se | 34 | 74 | 0·87 | 73·9439 |
| | | 76 | 9·02 | .... |
| | | 77 | 7·58 | .... |
| | | 78 | 23·52 | .... |
| | | 80 | 49·82 | .... |
| | | 82 | 9·19 | .... |
| Br | 35 | 79 | 50·52 | 78·94349 |
| | | 81 | 49·48 | 80·94215 |
| Kr | 76 | 78 | 0·354 | 77·9449 |
| | | 80 | 2·27 | 79·9419 |
| | | 82 | 11·56 | 81·9394 |
| | | 83 | 11·55 | 82·9403 |
| | | 84 | 56·90 | 83·9381 |
| | | 86 | 17·37 | 85·9382 |

| মৌল | Z | A | আপেক্ষিক প্রাচুর্য (%) | পরমাণবিক ভর |
|---|---|---|---|---|
| Rb | 37 | 85 | 72·15 | 84·9389 |
| | | 87§ | 27·85 | 86·9368 |
| Sr | 38 | 84 | 0·56 | .... |
| | | 86 | 9·86 | 85·9354 |
| | | 87 | 7·02 | 86·9352 |
| | | 88 | 82·56 | 87·9336 |
| Y | 39 | 89 | 100 | 88·93712 |
| Zr | 40 | 90 | 51·46 | .... |
| | | 91 | 11·23 | .... |
| | | 92 | 17·11 | .... |
| | | 94 | 17·40 | .... |
| | | 96 | 2·80 | .... |
| Nb | 41 | 93 | 100 | .... |
| Mo | 42 | 92 | 15·86 | .... |
| | | 94 | 9·12 | 93·93522 |
| | | 95 | 15·70 | .... |
| | | 96 | 16·50 | 95·93558 |
| | | 97 | 9·45 | 96·93693 |
| | | 98 | 23·75 | 97·93610 |
| | | 100 | 9·62 | 99·93829 |
| Tc | 43 | .... | .... | .... |
| Ru | 44 | 96 | 5·7 | .... |
| | | 98 | 2·2 | .... |
| | | 99 | 12·8 | .... |
| | | 100 | 12·7 | .... |
| | | 101 | 17·0 | .... |
| | | 102 | 31·3 | .... |
| | | 104 | 18·3 | .... |
| *Rh* | *45* | *103* | *100* | .... |
| *Pd* | *46* | *102* | *0·8* | .... |
| | | *104* | *9·3* | 103·93655 |
| | | 105 | 22·6 | 104·9384 |
| | | 106 | 27·2 | 105·9368 |
| | | 108 | 26·8 | 107·93801 |
| | | 110 | 13·5 | 109·93965 |

| মৌল | $Z$ | $A$ | আপেক্ষিক প্রাচুর্য (%) | পরমাণবিক ভর |
|---|---|---|---|---|
| Ag | 47 | 107 | 51·35 | 106·9389 |
| | | 109 | 48·65 | 108·9393 |
| Cd | 48 | 106 | 1·215 | 105·93984 |
| | | 108 | 0·875 | 107·93860 |
| | | 110 | 12·39 | 109·93857 |
| | | 111 | 12·75 | 110·93178 |
| | | 112 | 24·07 | 111·93885 |
| | | 113 | 12·26 | 112·94061 |
| | | 114 | 28·86 | 113·93997 |
| | | 116 | 7·58 | 115·94202 |
| In | 49 | 113 | 4·23 | 112·9401 |
| | | 115 | 95·77 | 114·94040 |
| Sn | 50 | 112 | 0·95 | 111·9403 |
| | | 114 | 0·65 | 113·94109 |
| | | 115 | 0·34 | 114·94014 |
| | | 116 | 14·24 | 115·93927 |
| | | 117 | 7·57 | 116·94052 |
| | | 118 | 24·01 | 117·93978 |
| | | 119 | 8·58 | 118·94122 |
| | | 120 | 32·97 | 119·94288 |
| | | 122 | 4·71 | 121·94249 |
| | | 124 | 5·98 | 123·94490 |
| Sb | 51 | 121 | 57·25 | 120·9420 |
| | | 123 | 42·75 | 122·9431 |
| Te | 52 | 120 | 0·089 | 119·94288 |
| | | 122 | 2·46 | 121·94193 |
| | | 123 | 0·87 | 122·94368 |
| | | 124 | 4·61 | 123·94278 |
| | | 125 | 6·99 | 124·94460 |
| | | 126 | 18·71 | 125·9420 |
| | | 128 | 31·79 | 127·94649 |
| | | 130 | 34·49 | 129·94853 |
| I | 53 | 127 | 100 | 126·94528 |
| Xe | 54 | 124 | 0·096 | 123·94578 |
| | | 126 | 0·090 | 125·94476 |

| মৌল | Z | A | আপেক্ষিক প্রাচুর্য (%) | পরমাণবিক ভর |
|---|---|---|---|---|
| | | 128 | 1·919 | 127·94446 |
| | | 129 | 26·44 | 128·94528 |
| | | 130 | 4·08 | 129·94501 |
| | | 131 | 21·18 | 130·94673 |
| | | 132 | 26·89 | 131·94673 |
| | | 134 | 10·44 | 133·94803 |
| | | 136 | 8·87 | 135·95046 |
| Cs | 55 | 133 | 100 | 132·9472 |
| Ba | 56 | 130 | 0·101 | 129·9474 |
| | | 132 | 0·097 | .... |
| | | 134 | 2·42 | 133·9468 |
| | | 135 | 6·59 | .... |
| | | 136 | 7·81 | 135·9488 |
| | | 137 | 11·32 | 136·9502 |
| | | 138 | 71·66 | 137·9498 |
| La | 57 | 138§ | 0·089 | 137·9501 |
| | | 139 | 99·911 | 138·9495 |
| Ce | 58 | 136 | 0·193 | .... |
| | | 138 | 0·250 | .... |
| | | 140 | 88·48 | 139·9489 |
| | | 142 | 11·07 | 141·9537 |
| Pr | 59 | 141 | 100 | 140·9514 |
| Nd | 60 | 142 | 27·13 | .... |
| | | 143 | 12·20 | .... |
| | | 144 | 23·87 | 143·9560 |
| | | 145 | 8·30 | .... |
| | | 146 | 17·18 | .... |
| | | 148 | 5·72 | .... |
| | | 150 | 5·60 | 149·9687 |
| Pm | 61 | 145 | .... | .... |
| Sm | 62 | 144 | 3·16 | .... |
| | | 147§ | 15·07 | .... |
| | | 148 | 11·27 | .... |
| | | 149 | 13·84 | .... |
| | | 150 | 7·47 | .... |

| মৌল | Z | A | আপেক্ষিক প্রাচুর্য (%) | পরমাণবিক ভর |
|---|---|---|---|---|
| | | 152 | 26·63 | .... |
| | | 154 | 22·53 | .... |
| Eu | 63 | 151 | 47·77 | .... |
| | | 153 | 52·23 | .... |
| Gd | 64 | 152 | 0·20 | .... |
| | | 154 | 2·15 | .... |
| | | 155 | 14·73 | .... |
| | | 156 | 20·47 | .... |
| | | 157 | 15·68 | .... |
| | | 158 | 24·87 | .... |
| | | 160 | 21·90 | .... |
| Tb | 65 | 159 | 100 | .... |
| Dy | 66 | 156 | 0·0524 | .... |
| | | 158 | 0·0902 | .... |
| | | 160 | 2·294 | .... |
| | | 161 | 18·88 | .... |
| | | 162 | 25·53 | .... |
| | | 163 | 24·97 | .... |
| | | 164 | 28·18 | .... |
| Ho | 67 | 165 | 100 | .... |
| Er | 68 | 162 | 0·136 | .... |
| | | 164 | 1·56 | .... |
| | | 166 | 33·41 | .... |
| | | 167 | 22·94 | .... |
| | | 168 | 27·07 | .... |
| | | 170 | 14·88 | .... |
| Tm | 69 | 169 | 100 | .... |
| Yb | 70 | 168 | 0·140 | .... |
| | | 170 | 3·03 | .... |
| | | 171 | 14·31 | .... |
| | | 172 | 21·82 | .... |
| | | 173 | 16·13 | .... |
| | | 174 | 31·84 | .... |
| | | 176 | 12·73 | .... |
| Lu | 71 | 175 | 97·40 | .... |

| মৌল | Z | A | আপেক্ষিক প্রাচুর্য (%) | পরমাণবিক ভর |
|---|---|---|---|---|
| | | 176§ | 2·60 | .... |
| Hf | 72 | 174 | 0·18 | .... |
| | | 176 | 5·15 | 175·9923 |
| | | 177 | 18·39 | .... |
| | | 178 | 27·08 | 177·9936 |
| | | 179 | 13·78 | .... |
| | | 180 | 35·44 | 180·0029 |
| Ta | 73 | 181 | 100 | 181·0031 |
| W | 74 | 180 | 0·135 | .... |
| | | 182 | 26·4 | 182·0033 |
| | | 183 | 14·4 | 183·0059 |
| | | 184 | 30·6 | 184·0052 |
| | | 186 | 28·4 | .... |
| Re | 75 | 185 | 37·07 | .... |
| | | 187 | 62·93 | .... |
| Os | 76 | 184 | 0·018 | .... |
| | | 186 | 1·59 | .... |
| | | 187 | 1·64 | .... |
| | | 188 | 13·3 | .... |
| | | 189 | 16·1 | .... |
| | | 190 | 26·4 | .... |
| | | 192 | 41·0 | .... |
| Tr | 77 | 191 | 38·5 | .... |
| | | 193 | 61·5 | .... |
| Pf | 78 | 190 | 0·012 | .... |
| | | 192 | 0·78 | .... |
| | | 194 | 32·8 | 194·0256 |
| | | 195 | 33·7 | .... |
| | | 196 | 25·4 | 196·02744 |
| | | 198 | 7·23 | .... |
| Au | 79 | 197 | 100 | |
| Hg | 80 | 196 | 0·146 | .... |
| | | 198 | 10·02 | .... |
| | | 199 | 16·84 | .... |
| | | 200 | 23·13 | .... |

| মৌল | $Z$ | $A$ | আপেক্ষিক প্রাচুর্য (%) | পরমাণবিক ভর |
|---|---|---|---|---|
| | | 201 | 13·22 | .... |
| | | 202 | 29·80 | .... |
| | | 204 | 6·85 | .... |
| Tl | 81 | 203 | 29·50 | .... |
| | | 205 | 70·50 | .... |
| Pb | 82 | 204 | 1·48 | .... |
| | | 206 | 23·6 | 206·04519 |
| | | 207 | 22·6 | 207·04725 |
| | | 208 | 52·3 | 208·04754 |
| Bi | 83 | 209 | 100 | 209·05325 |
| Th | 90 | 232§ | 100 | 232·11852 |
| U | 92 | 234§ | 0·0052 | 234·12115 |
| | | 235§ | 0·715 | 235·12517 |
| | | 238§ | 99·28 | 238·13232 |

# পরিশিষ্ট A-6

## পরিভাষার তালিকা

Abscissa—ভুজ
Absorber—শোষক
Absorption Coefficient
—শোষণ গুণাংক
Absorption Edge
—শোষণ সীমা
A. C.—পরিবর্তী ( প্রবাহ )
Accelerate—ত্বরিত করা
Acceleration—ত্বরণ
Accelerator—ত্বরণযন্ত্র
Accelerator, Linear
—রৈখিক ত্বরণযন্ত্র
Accelerator, Cyclic
Resonance—চক্রাবর্ত অনুনাদী ত্বরণযন্ত্র
Accuracy—সঠিকতা
Activated—সক্রিয়কৃত
Amorphous—অনিয়তাকার
Amplifier—পরিবর্ধক
Amplitude—বিস্তার
Angular Momentum
—কৌণিক ভরবেগ
Annihilation Radiation
বিনাশজনিত বিকিরণ
Annulus—বলয়াকৃতি
Anomalous—অস্বাভাবিক
Anti Particle—বিপরীত কণিকা

Artificial—কৃত্রিম
Assumption—অনুমান
Asymptote—অসীমপথ
Atom—পরমাণু
Atomic Number
—পরমাণবিক সংখ্যা
Atomic Weight
—পরমাণবিক ভার
Aurora Borealis
—মেরুজ্যোতি
Automatic Recorder
—স্বতশ্চালিত অভিলেখ
Azimuth—দিগংশ
Azimuthal Quantum
Number—দিগংশীয় কোয়ানটাম সংখ্যা

Band—পটি
Band Head—পটিশীর্ষ
Band, Permitted
—অনুমোদিত পটি
Band Spectrum—পটি বর্ণালী
Band System—পটিগুচ্ছ
Band Theory—পটিতত্ত্ব
Band, Valence—সংযোজী পটি
Beat—স্বরকম্প
Binding Energy—বন্ধন শক্তি

Binding Fraction —বন্ধন ভগ্নাংশ
Bombardment—বর্ষণ
Breeder Reactor —প্রজনক বিক্রিয়া
Bubble Chamber—বুদ্‌বুদ কক্ষ

Calibrate—ক্রমাংকিত করা
Capacitor—ধারক
Capacity—ধারকত্ব
Capillary—কৈশিক
Central Force —কেন্দ্রাভিমুখী বল
Centrifugal—অপকেন্দ্রিক
Centripetal—অভিকেন্দ্রিক
Chain Reaction —শৃংখল বিক্রিয়া
Charge—আধান
Classical—সনাতন
Cleavage—বিদারণ
Cloud Chamber—মেঘ-কক্ষ
Co-axial—সমাক্ষ
Coefficient—গুণাংক
Coincidence—সমাপাতন
Coincidence, Anti —বিষমাপতন
Collimate—সমান্তরিত করা
Collision—সংঘাত, সংঘর্ষ
Collision Loss —সংঘাত জনিত ক্ষয়
Component—উপাংশ
Compound—যৌগ
Compress—সংনমিত করা
Concentration —ঘনত্ব ; গাঢ়তা
Condense—ঘনীভূত করা
Condenser—ধারক
Conductivity—পরিবাহিতা
Conductor—পরিবাহী
Conservation—সংরক্ষণ
Constellation—তারামণ্ডল
Continuous (Spectrum) —নিরবচ্ছিন্ন ( বর্ণালী )
Continuum—নিরবচ্ছিন্ন অঞ্চল
Contraction—সংকোচন
Convergence Limit —অভিসারী সীমা
Conversion Coefficient —অবস্থান্তর গুণাংক
Convex—উত্তল
Correspondence Principle —সাদৃশ্য তত্ত্ব
Cosmic Rays —মহাজাগতিক রশ্মি
Counter—সংখ্যায়ক
Counter Controlled —সংখ্যায়ক নিয়ন্ত্রিত
Counter, Proportional —আনুপাতিক সংখ্যায়ক
Crest—তরঙ্গশীর্ষ
Critical Potential —সংকট বিভব
Cross Section—প্রস্থচ্ছেদ
Crystal—কেলাস

Crystal, Single —একক কেলাস
Crystallization—কেলাসন
Curvature—বক্রতা
Cylinder—বেলন
Cylindrical—বেলনাকৃতি

Data—রাশিমালা ; উপাত্ত
Daughter Element —সৃষ্ট মৌল
D. C.—সমদিষ্ট ( প্রবাহ )
Deposit—পরিন্যাস
Detector—নির্দেশক
Diaphragm—মধ্যচ্ছদা
Diatomic—দ্বিপরমাণুক
Differential Equation —অবকল সমীকরণ
Differentiation—অবকলন
Diffraction—ব্যবর্তন
Diffraction Grating —ব্যবর্তন ঝাঁঝরি
Diffraction Pattern —ব্যবর্তন নক্‌শা
Diffusion—ব্যাপন
Dilatation—দীর্ঘসূত্রতা
Dimension—মাত্রা
Dipole—দ্বিমেরু
Dipole Moment —দ্বিমেরু ভ্রামক
Discharge—মোক্ষণ
Discrete—অবচ্ছিন্ন
Disintegration—বিঘটন
Disintegration Constant —বিঘটন ধ্রুবক
Dispersion—বিচ্ছুরণ
Disturbance—( তরঙ্গ ) বিক্ষোভ
Divalent—দ্বিযোজী
Divergent—অপসারী

Eccentricity—উৎকেন্দ্রতা
Elasticity—স্থিতিস্থাপকতা
Electrode—তড়িৎদ্বার
Electrodynamics —তড়িৎ-গতিবিদ্যা
Electrolysis—তড়িৎ বিশ্লেষণ
Electromagnetic —তড়িৎচুম্বকীয়
Electronegative —তড়িৎ ঋণাত্মক
Electropositive —তড়িৎ ধনাত্মক
Electroscope—তড়িৎবীক্ষণ
Electrostatic—স্থির তড়িৎ
Element—মৌল
Ellipse—উপবৃত্ত
Ellipsoid—উপগোলক
Emulsion—অবদ্রব
Endoergic—শক্তি-গ্রাহী
Energy—শক্তি
Energy, Binding—বন্ধন-শক্তি
Energy, Excitation —উত্তেজনা শক্তি
Energy Level—শক্তিস্তর
Enriched (Isotope)—সমৃদ্ধ

Equilibrium —সাম্যাবস্থা ; স্থিতাবস্থা
Equipartition—সমবণ্টন
Equivalent—সমতুল্য
Equivalence—সমতুল্যতা
Exchange Force —বিনিময় বল
Exclusion Principle —অপবর্জন তত্ত্ব
Exoergic—শক্তি-দায়ী
Expansion—প্রসারণ
Exponential Law—সূচক সূত্র
Eye piece—অভিনেত্র

Face Centred—তল কেন্দ্রিক
Fast Breeder—দ্রুত প্রজনক
Fast Fission Factor —দ্রুত বিভাজন সংখ্যা
Filament—তন্তু
Filter—পরিস্রাবক
Fine Structure—সূক্ষ্ম গঠন
Fission—বিভাজন
Fission Fragment —বিভাজন-খণ্ড
Fluorescence—প্রতিপ্রভা
Forbidden Zone —নিষিদ্ধ অঞ্চল
Frame of Reference —নির্দেশক ফ্রেম
Frequency—কম্পাংক
Frequency Modulated —কম্পাংক নিয়ন্ত্রিত
Fringe—ডোরা
Function—অপেক্ষক
Fundamental Particle —মৌলিক কণিকা
Fusion—সংযোজন

Galaxy—ছায়াপথ
Generator—উৎপাদক
Geomagnetic—ভূচুম্বকীয়
Glancing Angle—তির্যক কোণ
Gradient—নতিমাত্রা
Grating—ঝাঁঝরি
Gravitation—মহাকর্ষ
Ground Potential —ভৌম বিভব
Ground State—ভৌম অবস্থা
Group Velocity—গুচ্ছবেগ
Gyromagnetic Ratio —ঘূর্ণ-চৌম্বক অনুপাত

Half Cycle—অর্ধকম্পনকাল
Half Life—অর্ধজীবনকাল
Half Value Thickness —অর্ধমান বেধ
Hard Radiation —কঠিন বিকিরণ
Heavy Water—ভারী জল
Helical—সর্পিল
Heterogeneous—অসমসত্ত্ব
Homogeneous—সমসত্ত্ব
Hydrodynamic—উদ্‌গতীয়
Hygroscopic—জলাকর্ষী

Hyperbola—পরাবৃত্ত
Hyperfine Structnre —অতি সূক্ষ্ম গঠন

Impact Parameter —সংঘাত মাপ
Impurity—অপদ্রব্য
Induction—আবেশ
Induction Coil —আবেশ কুণ্ডলী
Inductor—আবেশক
Inelastic—অস্থিতিস্থাপক
Inert Gas—উদাসী গ্যাস
Inertial Frame—জড় ফ্রেম
Infra Red—অবলোহিত
Insulation—অন্তরণ
Insulator—অন্তরক
Integration—সমাকলন
Intensity (of light)—তীব্রতা
Intensity (of field)—প্রাবল্য
Interaction—বিক্রিয়া
Intercept—অন্তর্দৈর্ঘ্য
Interference—ব্যতিচার
Interferometer —ব্যতিচারমাপক
Internal Conversion —আভ্যন্তরীণ অবস্থান্তর
Ionization—আয়নন
Ionization Chamber —আয়নন কক্ষ
Ionization Loss —আয়নন জনিত শক্তিক্ষয়
Ionizing Agent —আয়ন উৎপত্তি কারক

Jacket—আবরণী

Kinetic Theory—গতীয় তত্ত্ব

Latent Heat—লীন তাপ
Lattice—জাফরি
Law—সূত্র
Leak—ছিদ্র
Leakage (of Charge) —ক্ষরণ
Linear—একঘাত ; রৈখিক
Linear Oscillator —রৈখিক স্পন্দক
Longitudinal—অনুদৈর্ঘ্য
Luminous—দীপ্তিমান

Magnetic Flux —চৌম্বক ক্ষেত্রধারা
Magnetic Moment —চৌম্বক-ভ্রামক
Magnetic Shell—পাত চুম্বক
Magnetic Spectrograph —চৌম্বক বর্ণালীলেখ
Magnitude—মাত্রা ; মান
Major Axis—পরাক্ষ
Mass Defect—ভর ত্রুটি
Mass Energy Equivalence —ভর শক্তি সমতুল্যতা
Mass Number—ভরসংখ্যা

Mass Spectrograph —ভর বর্ণালীলেখ
Mass Spectrometer —ভর বর্ণালীমাপক
Mechanism—ক্রিয়াবিধি
Mean Free Path —গড় মুক্ত পথ
Mean Life—গড় জীবনকাল
Metastable—দীর্ঘস্থায়ী
Minor Axis—উপাক্ষ
Mobility—গতিশীলতা
Model—প্রতিরূপ
Moderator—নিয়ন্ত্রক
Molecule—অণু
Molecular Weight —আণবিক ভার
Moment of Inertia —জড়ত্ব ভ্রামক
Momentum—ভরবেগ
Monochromatic—একবর্ণী
Monovalent—একযোজী
Multiple—গুণিতক
Multiplication Constant —পরিবর্ধন ধ্রুবক

Nebula—নীহারিকা
Normal State —স্বাভাবিক অবস্থা
Nuclear Reaction —কেন্দ্রক বিক্রিয়া
Nuclear Reactor —কেন্দ্রকীয় বিক্রিয়ক
Nuclear Transformation —কেন্দ্রক রূপান্তর
Nucleus—কেন্দ্রক

Objective—অভিলক্ষ্য
Observer—নিরীক্ষক
Opacity—অনচ্ছতা
Opaque—অনচ্ছ ; অস্বচ্ছ
Orbit—কক্ষপথ
Orbital—কক্ষীয়
Order—ক্রম ; অনুক্রম
Ordinate—কোটি
Orientation—দিগ্‌বিন্যাস
Origin—মূলবিন্দু
Oscillation—কম্পন
Oscillator —কম্পন উৎপাদক, কম্পক
Oscilloscope—কম্পনবীক্ষণ

Packing Fraction —সমাবেশ ভগ্নাংশ
Pair Creation—যুগল উৎপাদন
Pair Spectrometer —যুগল বর্ণালীমাপক
Pairing Energy—যুগল শক্তি
Parabola—অধিবৃত্ত
Parent Element —স্রষ্টা মৌল
Parity—সমতা
Particle—কণিকা
Peak—চূড়া
Penetrability—ভেদ্যতা

Penetrating Radiation —উচ্চভেদী বিকিরণ
Pentavalent—পঞ্চযোজী
Periodic—পর্যাবৃত্ত
Periodic Table—পর্যায় সারণী
Phase—দশা
Phase Stability—দশা স্থায়িত্ব
Phase Velocity—দশাবেগ
Phenomenon—সংঘটন
Photo Conductivity —সালোক পরিবাহিতা
Photo Electric —আলোক তাড়িত
Photo Multiplier —আলোক তাড়িত পরিবর্ধক
Photo Synthesis —সালোক সংশ্লেষ
Photo Voltaic Cell —আলোক ভোল্টীয় কোষ
Phosphorescence—অনুপ্রভা
Physical System —ভৌতমণ্ডলী
Polar Coordinates —মেরুরেখা স্থানাংক
Polar Molecule—সমেরু অণু
Polarization—সমবর্তন
Polarizability—সমবর্তিতা
Potential—বিভব
Potential Barrier —বিভব প্রতিবন্ধক
Potential Well—বিভব কূপ
Positive Glow—ধনাত্মক দীপ্তি
Positive Ray—ধনাত্মক রশ্মি
Precession—অয়নচলন
Primary (Radiation) —মুখ্য ( বিকিরণ )
Principal Quantum Number—প্রধান কোয়ানটাম সংখ্যা
Principle—মতবাদ ; তত্ত্ব
Probability—সম্ভাব্যতা
Process—প্রক্রিয়া
Projectile—প্রক্ষিপ্ত কণিকা
Projection—অভিক্ষেপ
Propagate—সঞ্চারিত হওয়া ; বিস্তার লাভ করা
Pulse—ঝলক
Pulse Height Selector —ঝলক-বিস্তার নির্বাচক

Quadrant—বৃত্তপাদ

Radial—কৈন্দ্রিক
Radiation Belt —বিকিরণ বেষ্টনী
Radioactive—তেজস্ক্রিয়
Radioactivity—তেজস্ক্রিয়তা
Radio Frequency —বেতার কম্পাংক
Radius Vector—দূরক
Range (of a particle) —পথসীমা
Range (of interaction) —দূরত্বসীমা
Rare Earth—বিরল মৃত্তিকা

Reaction—বিক্রিয়া
Recoil—প্রতিক্ষেপ
Recombination—পুনর্সংযোজন
Rectifier—একমুখীকারক
Rectify—একমুখীকৃত করা
Reduced Mass—পরিণত ভর
Relative Abundance —আপেক্ষিক প্রাচুর্য
Remote Control—দূর নিয়ন্ত্রক
Repulsion—বিকর্ষণ
Residual Nucleus —অবশিষ্ট কেন্দ্রক
Resonance Capture —অনুনাদ আহরণ
Resonance Escape Probability —অনুনাদ উপেক্ষণ সম্ভাব্যতা
Resonant Cavity —অনুনাদী গহ্বর
Rest Energy—স্থির শক্তি
Rest Mass—স্থির ভর
Resultant—লব্ধি
Retardation—মন্দন
Retarding Potential —প্রতিবন্ধ বিভব
Rigidity—দৃঢ়তা
Ring Shaped—বলয়াকৃতি
Rotation—আবর্তন
Rotation Spectrum —আবর্তন বর্ণালী
Rotation Vibration Spectrum—আবর্তন স্পন্দন বর্ণালী
Rotational Energy —আবর্তন শক্তি
Rotational Periodic Motion —চক্রায়িত পর্যাবৃত্ত গতি

Saturated—সম্পৃক্ত
Scale—মাপনী
Scattering—বিক্ষেপ
Scatterer—বিক্ষেপক
Scintillation—চমক
Scintillator—চমক উৎপাদক
Secondary (Radiation) —গৌণ ( বিকিরণ )
Secular Equilibrium —দীর্ঘস্থায়ী স্থিতাবস্থা
Selection Rule —নির্বাচন সূত্র
Self Sustained—স্বতশ্চালিত
Semi Conductor —অর্ধপরিবাহী
Sensitive—সুবেদী
Shear—মোচড়
Shell—খোলস
Shower (Cosmic Ray) —রশ্মিধারা
Shower, Extensive Air —দূরবিস্তারী বায়বীয় রশ্মিধারা
Simple Harmonic Motion —সরল সমঞ্জস গতি
Simultaneity—সমকালীনত্ব
Slit—রেখাছিদ্র
Slope—নতি

Soft Radiation —স্বল্পভেদী বিকিরণ
Solid Angle—ঘনকোণ
Space Charge—স্থান আধান
Space Quantization —স্থান কোয়ানটায়ন
Spallation—বিখণ্ডন
Spark—স্ফুলিংগ
Spark Chamber —স্ফুলিংগ-কক্ষ
Specific Charge —আপেক্ষিক আধান
Specific Energy Loss —শক্তিক্ষয়ের হার
Specific Heat—আপেক্ষিক তাপ
Specific Ionization —আয়নন হার
Specific Resistance —রোধ গুণাংক
Spectrograph—বর্ণালীলেখ
Spectrometer—বর্ণালীমাপক
Spectroscope—বর্ণালীবীক্ষণ
Spectroscopic—বর্ণালী বিষয়ক
Spherical—গোলকাকৃতি
Spin—ঘূর্ণন
Spiral—সর্পিল
Spontaneous—স্বতঃস্ফূর্ত
Statistics—সংখ্যায়ন
Step-up Transformer —আরোহী ট্র্যান্সফর্মার
Stopping Potential —নিরোধ বিভব
Straggling (of range) —মানচ্যুতি
Strain—বিকৃতি
Strange Particle —অদ্ভুত কণিকা
Strangeness—অদ্ভুতত্ব
Stress—পীড়ন
Stripping Reaction —বিচ্ছেদক বিক্রিয়া
Successive (Disintegration)—ক্রমায়াত
Supercooled—অতিশীতলীকৃত
Superposition—অধ্যারোপণ
Supersaturated—অতিপৃক্ত
Surface Tension —পৃষ্ঠটান
Symmetrical—প্রতিসম
Synchronous—সমলয়

Table—সারণী
Tangent—স্পর্শক
Target—লক্ষ্যবস্তু
Technique—কৌশল
Technology—শিল্পবিজ্ঞান
Temperature —উষ্ণতা ; তাপমাত্রা
Tensile Force—তন্যতা বল
Tetravalent—চতুর্যোজী
Thermal Diffusion —তাপীয় ব্যাপন
Thermal Utilization Factor—তাপীয় ব্যবহার সংখ্যা

Thermionic Emission —তাপায়ন নিঃসরণ ; তাপীয় ইলেকট্রন নিঃসরণ
Thermodynamics —তাপ গতিবিদ্যা
Thermo Nuclear Reaction —তাপীয় কেন্দ্রক বিক্রিয়া
Three Dimensional —ত্রিমাত্রিক
Threshold Energy —সূচনা শক্তি
Threshold Frequency —সূচনা কম্পাংক
Total Quantum Number —মোট কোয়ানটাম সংখ্যা
Trace Amount—কণামাত্রিক
Track—ভ্রমণপথ
Transformation—রূপান্তর
Transient—ক্ষণস্থায়ী
Transition—সংক্রমণ
Transmutation—রূপান্তর
Transparent—স্বচ্ছ
Transverse—তির্যক
Transuranium —ইউরেনিয়ামোত্তর
Trivalent—ত্রিযোজী
Trough—তরঙ্গপাদ
Tunnel Effect—সুড়ংগ ক্রিয়া
Two Dimensional—দ্বিমাত্রিক

Ultraviolet—অতিবেগনী
Uncertainty Principle —অনিশ্চয়তাবাদ
Unit—একক
Universal—সার্বিক
Universe—বিশ্বজগৎ
Unstable—অস্থায়ী

Valency—যোজ্যতা
Velocity—বেগ
Velocity Distribution —বেগ বণ্টন
Velocity Selector —বেগ নির্বাচক
Vertical—উল্লম্ব
Vibration—স্পন্দন
Virtual State —অবাস্তব অবস্থা
Viscosity—সান্দ্রতা
Viscous—সান্দ্র

Water Tight—জল-অপ্রবেশ্য
Water Boiler—জল স্ফুটক
Wave—তরঙ্গ
Wave Equation —তরঙ্গ সমীকরণ
Wave Guide—তরঙ্গচালক
Wave Packet—তরঙ্গ পুলিন্দা
Work Function —নিষ্পাদনীয় কার্য

Yield—উৎপাদন

## সম্পাদ্য §

1. একটি তেজস্ক্রিয় পদার্থ থেকে সময়ের সংগে $\beta$-কণিকা নিঃসরণের হার পরিবর্তন পরিমাপ করে নিম্নলিখিত রাশিমালা পাওয়া যায় :

| সময় (মিনিট) | 0 | 10 | 20 | 35 | 50 | 65 | 80 | 95 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $\beta$-নিঃসরণ হার (প্রতি মিনিটে) | 2160 | 1458 | 1007 | 609 | 346 | 212 | 125 | 71 |

$\beta$-নিঃসরণ হারের লগারিদ্‌ম ও সময়ের একটি লেখচিত্র এঁকে তার থেকে বিঘটন ধ্রুবক $\lambda$ এবং অর্ধজীবনকাল $\tau$ নির্ণয় কর।

2. একটি তেজস্ক্রিয় পদার্থের অর্ধজীবনকাল 24 দিন। কত সময় পরে এর প্রাথমিক পরমাণু সংখ্যার $\frac{7}{8}$ ভাগ বিঘটিত হয়ে যাবে? কত সময় পরে প্রাথমিক সংখ্যার 1/32 অংশ অবিঘটিত থাকবে? পদার্থটির বিঘটন ধ্রুবক ও গড় জীবনকাল কত?

3. কিছু পরিমাণ $Ra^{226}$ ($\tau = 1620$ বৎসর) থেকে দীর্ঘস্থায়ী স্থিতাবস্থায় বর্তমান রেডন পৃথকীকৃত করে 3.25 মাইক্রোগ্রাম $Rn^{222}$ গ্যাস ($\tau = 3{\cdot}84$ দিন) পাওয়া যায়। $Ra^{226}$ এর পরিমাণ কত ছিল?

4. দুটি আইসোটোপের ক্রমায়াত বিঘটনের ক্ষেত্রে (11·9) সমীকরণে প্রদত্ত $t_m$ সময় পরে সৃষ্ট মৌলের পরমাণু সংখ্যা যে সর্বোচ্চ হয় তা প্রমাণ কর। যদি $\tau_1 = 10$ ঘ, $\tau_2 = 1{\cdot}5$ ঘ হয়, তাহলে $t_m$ কত হয়? (4·84 ঘ)

5. থোরিয়াম, ইউরেনিয়াম-রেডিয়াম ও অ্যাকটিনিয়াম শ্রেণী তিনটিকে সাধারণতঃ $4n$, $4n+2$ ও $4n+3$ শ্রেণী বলা হয়, এখানে $n$ একটি পূর্ণসংখ্যা। এইরূপ নামকরণের কারণ কী? তিনটি শ্রেণীর ক্ষেত্রে $n$-এর সর্বোচ্চ ও সর্বনিম্ন মানগুলি নির্ণয় কর।

6. কোন ইউরেনিয়াম আকরিকের মধ্যে প্রতি গ্রাম $U^{238}$ এর সংগে 0.75 গ্রাম $Pb^{206}$ পাওয়া যায়। যদি ধরা যায় যে সমস্ত $Pb^{206}$ সৃষ্ট হয়েছে $U^{238}$ এর বিঘটন থেকে, তাহলে আকরিকটির বয়স কত? ($\tau_U = 4{\cdot}5 \times 10^9$ বৎসর)।

7. এক খণ্ড আকরিক থেকে প্রতি গ্রামে $2.8 \times 10^{-7}$ গ্রাম $U^{238}$ এবং প্রমাণ উষ্ণতা ও চাপে $4{\cdot}8 \times 10^{-5}$ ঘন সেমি হিলিয়াম গ্যাস পাওয়া যায়। আকরিকটির বয়স কত? ($1{\cdot}38 \times 10^9$ ব)

(ইংগিত : প্রতিটি $U^{238}$ কেন্দ্রক বিঘটিত হলে পরপর আটটি $\alpha$-কণিকা নিসৃত হয়)।

* * *

8. $Po^{210}$ ও $Po^{212}$ থেকে নিঃসৃত $\alpha$-কণিকার গতিশক্তি হয় যথাক্রমে 5·3 মি-ই-ভো এবং 8·776 মি-ই-ভো। দুই ক্ষেত্রে $\alpha$-কণিকার বেগ নির্ণয় কর। $M_\alpha = 6{\cdot}67 \times 10^{-24}$ গ্রাম ধরা যেতে পারে। ($1{\cdot}6 \times 10^9$ সেমি/সেকেণ্ড, $2.05 \times 10^9$ সেমি/সেকেণ্ড)

9. $Po^{210}$ থেকে নিঃসৃত 5·3 মি-ই-ভো শক্তি সম্পন্ন $\alpha$-কণিকাগুলিকে তাদের গতিপথের অভিলম্বে প্রযুক্ত $H$ চৌম্বক ক্ষেত্র দ্বারা বিচ্যুত করা হয়। $H$-এর মান যথাক্রমে 100 গাওস্, 1000 গাওস্, 10,000 গাওস্ ও 40,000 গাওস্ ধরে $\alpha$-কণিকাগুলির ভ্রমণপথের বক্রতা ব্যাসার্ধ

§ A-3 ও A-5 পরিশিষ্টে প্রদত্ত রাশিমালা ব্যবহার কর।

নির্ণয় কর। $M\alpha=6.67\times10^{-24}$ গ্রাম ও $e_\alpha=9.6\times10^{-10}$ $esu$ ধরা যেতে পারে। ($3.33\times10^5$ সেমি, 333 সেমি, 33.3 সেমি, 8.3 সেমি)

10. একটি ক্ষুদ্র $\alpha$-উৎস থেকে 10 সেমি দূরে অবস্থিত 2 মিমি ব্যাসার্ধ সম্পন্ন একটি সংগ্রাহক প্লেটের উপরে এক ঘণ্টা ধরে $\alpha$-কণিকা আপতিত করা হয়। উৎসের তেজস্ক্রিয়তা যদি 5 মিলি-কুরী হয়, তাহলে সংগ্রাহকের উপর কত পরিমাণ আধান জমা হবে? $\alpha$-কণিকার আধান $9.6\times10^{-10}$ $esu$ ধরা যেতে পারে। ($6.39\times10^{-2}$ $esu$)

11. (8) সম্পাদ্যে প্রদত্ত রাশিমালা ব্যবহার করে $P_o^{210}$ ও $P_o^{212}$ এর $\alpha$-বিঘটন শক্তি নির্ণয় কর। এই দুই ক্ষেত্রে প্রতিক্ষিপ্ত অবশিষ্ট কেন্দ্রক দুটির বেগ ও গতিশক্তি নির্ণয় কর। উভয় ক্ষেত্রে মোট বিঘটন শক্তির কত ভাগ $\alpha$-কণিকা ও কত ভাগ অবশিষ্ট কেন্দ্রক পায়?

12. $Ra^{226}$ এর $\alpha$-বিঘটনের ফলে সৃষ্ট $Rn^{222}$ এর পরমাণবিক ভর হচ্ছে 222.08690 $amu$। যদি $\alpha$-বিঘটন শক্তি হয় $Q\alpha=4.863$ মি-ই ভো এবং $M$ ($He^4$) = 4.003874 $amu$ হয়, তাহলে $Ra^{226}$ এর পরমাণবিক ভর কত? 1 $amu$ = 931.2 মি-ই ভো ধরা যেতে পারে। (226.095997 $amu$)

13. একটি 6.0 মি-ই-ভো শক্তির $\alpha$-কণিকা একটি পারদ ($Z=80$) কেন্দ্রক থেকে 120° কোণে বিক্ষিপ্ত হয়। কেন্দ্রক থেকে $\alpha$-কণিকাটির ন্যূনতম দূরত্ব কত ছিল? ($4.14\times10^{-12}$ সেমি)

14. প্রমাণ কর যে নির্দিষ্ট শক্তি ($E\alpha$) সম্পন্ন কোন $\alpha$-কণিকা একটি বিক্ষেপক কেন্দ্রক থেকে $q_m=2Ze^2/E\alpha$ অপেক্ষা বেশী কাছে আসতে পারে না।

(ইংগিত: 12.16 ও 12.18 সমীকরণ ব্যবহার কর। বিকল্পে শক্তি সংরক্ষণ সূত্র ব্যবহার করেও প্রমাণ করা যেতে পারে।)

15. যদি সোনার পরমাণবিক ভার প্রায় 197 ধরা হয়, তাহলে একটি $1.0\times10^{-5}$ সেমি বেধ সম্পন্ন সোনার পাতে প্রতি একক ক্ষেত্রফলে কতগুলি কেন্দ্রক থাকে? সোনার ঘনত্ব = 19.3 গ্রাম/সেমি$^3$। ($5.9\times10^{17}$)

16. নিম্নলিখিত কেন্দ্রকগুলির উপরিপৃষ্ঠে $\alpha$-কণিকার জন্য বিভব প্রতিবন্ধকের উচ্চতা মি-ই-ভো এককে নির্ণয় কর: $Mg^{24}$, $Ca^{40}$, $Co^{59}$, $Ag^{107}$, $I^{131}$, $Au^{197}$ এবং $Th^{232}$। কেন্দ্রকগুলির ব্যাস (12.31) সমীকরণের সাহায্যে নির্ণয় কর। $r_0=1.5\times10^{-13}$ সেমি ধরা যেতে পারে।

* * *

17. কোন কেন্দ্রক থেকে নিঃসৃত $\beta$-কণিকার উচ্চতম গতিশক্তি 1.17 মি-ই-ভো। আপেক্ষিকতাবাদ অনুযায়ী এদের বেগ নির্ণয় কর। সনাতন বলবিদ্যা প্রয়োগ করলে নির্ণীত বেগ কত হয়? আপেক্ষিকতাবাদের সংগে শেষোক্ত ফলাফলের অসংগতি লক্ষ্য কর। (ইলেকট্রনের স্থির ভরশক্তি 0.51 মি-ই-ভো ধরা যেতে পারে। (0.95; 2.14$c$)

18. 1, 2, 5 এবং 10 মি-ই-ভো গতিশক্তি সম্পন্ন $\beta$-কণিকা, প্রোটন ও $\alpha$-কণিকার আপেক্ষিকতাবাদ অনুযায়ী প্রাপ্ত ভর ও এদের স্থির ভরের অনুপাত নির্ণয় কর। ইলেকট্রনের স্থির ভরশক্তি 0.5 মি-ই-ভো ধর। প্রোটন ও $\alpha$-কণিকা ইলেকট্রন অপেক্ষা যথাক্রমে 1836 ও 7344 গুণ ভারী। প্রদত্ত শক্তিগুলিতে শেষোক্ত দুই ক্ষেত্রে আপেক্ষিকতাবাদের প্রভাব কী বিশেষ লক্ষণীয়? কেন?

19. ইলেকট্রন ও $\alpha$-কণিকার আপেক্ষিকতাবাদ অনুযায়ী প্রাপ্ত ভর এদের স্থির ভরের দ্বিগুণ হতে হলে, এদের গতিশক্তি ও বেগ কত হওয়া প্রয়োজন ?

20. একটি চৌম্বক বর্ণালীমাপক যন্ত্রে 1 মি-ই-ভো গতিশক্তি সম্পন্ন ইলেকট্রনের ভ্রমণপথের বক্রতা-ব্যাসার্ধ 10 সেমি হতে হলে প্রযুক্ত চৌম্বক ক্ষেত্র কত হওয়া প্রয়োজন ? প্রযুক্ত চৌম্বক ক্ষেত্র 500 গাওস্ হলে ইলেকট্রনগুলির ভ্রমণ পথের বক্রতা-ব্যাসার্ধ কত হয় ?

21. একটি চৌম্বক বর্ণালীমাপক যন্ত্রে $10^3$ গাওস প্রযুক্ত চৌম্বক ক্ষেত্রে একগুচ্ছ ইলেকট্রনের ভ্রমণপথের বক্রতা-ব্যাসার্ধ 4·8 সেমি। ইলেকট্রনগুলির গতিশক্তি কত ?

22. $Ni^{64}$ $(Z=28)$, $Cu^{64}$ $(Z=29)$ ও $Zn^{64}$ $(Z=30)$ আইসোটোপগুলির পরমাণবিক ভর হচ্ছে যথাক্রমে 63·94813, 63·94994 এবং 63·94932 *amu*। এদের মধ্যে কোনটি $\beta$-বিঘটনশীল এবং সেটির কী ধরণের $\beta$-বিঘটন ( অর্থাৎ $\beta^-$, $\beta^+$ বা $E.C$ ) হয় ? বিভিন্ন ক্ষেত্রে $Q$ নির্ণয় কর।

23. $Li^7$ $(Z=3)$ ও $Be^7$ $(Z=4)$ আইসোটোপ দুটির পরমাণবিক ভর হচ্ছে যথাক্রমে 7·018232 এবং 7·019160 *amu*। এদের মধ্যে কোনটি $\beta$-বিঘটনশীল সেটির কী ধরনের $\beta$-বিঘটন হয় ? বিঘটনের $Q$ নির্ণয় কর। ( 0·864 মি-ইভো )

24. মুক্তাবস্থায় একটি নিউট্রন 0·782 মি-ই-ভো উচ্চতম শক্তি সম্পন্ন $\beta^-$ কণিকা নিঃসৃত করে বিঘটিত হয়। ইলেকট্রনের স্থির ভর 0·000548 *amu* ও নিউট্রনের ভর 1·008986 *amu* হলে $H^1$ এবং প্রোটনের ভর নির্ণয় কর। $(M_H=1{\cdot}008146\ amu\ ;\ M_p=1{\cdot}007598\ amu)$

* * *

25. সীসার মধ্যে কোন উৎস থেকে নিঃসৃত $\gamma$-রশ্মির শোষণ পরীক্ষা করে অর্ধমান বেধ পাওয়া যায় 11·2 গ্রাম/সেমি²। এই $\gamma$-রশ্মির ভর শোষণ গুণাংক কত ? সীসার ঘনত্ব $\rho=11{\cdot}35$ গ্রাম/সেমি³ হলে উক্ত $\gamma$-রশ্মির রৈখিক শোষণ গুণাংক কত ?

26. $Sc^{44}$ নিঃসৃত $\gamma$-রশ্মি কর্তৃক প্ল্যাটিনাম থেকে উচ্ছিন্ন ইলেকট্রনগুলি একটি চৌম্বক বর্ণালীমাপক যন্ত্র দ্বারা বিশ্লেষণ করে $Hr=3230$ গাওস-সেমি মানে একটি ফোটো-চূড়া পাওয়া যায়। যদি প্ল্যাটিনামের K-ইলেকট্রনগুলির বন্ধন-শক্তি 0·078 মি-ই-ভো হয়, তবে $\gamma$-রশ্মির শক্তি কত মি-ই-ভো ? এর তরঙ্গদৈর্ঘ্যই বা কত ?

27. (14·5) সমীকরণের সাহায্যে দেখাও যে কম্পটন ক্রিয়ার দ্বারা প্রতিক্ষিপ্ত ইলেকট্রনের সর্বোচ্চ শক্তি হয় $E_c=h\nu/(1+m_0c^2/2h\nu)$। যদি $h\nu \gg m_0c^2$ হয় তাহলে প্রমাণ কর যে $E_c \simeq (h\nu-0{\cdot}25)$ মি-ই-ভো।

28. $Na^{24}(Z=11)$ থেকে 1·4 মি-ই-ভো এবং অল্প কিছু ক্ষেত্রে 4·12 মি-ই-ভো উচ্চতম শক্তি সম্পন্ন $\beta$-রশ্মি নিঃসৃত হয়। তাছাড়া এর থেকে 1·38 মি-ই-ভো এবং 2·72 মি-ই-ভো শক্তি সম্পন্ন দুটি $\gamma$-রশ্মি দেখা যায়। $Na^{24}$ এর সম্ভাব্য অবক্ষয় চিত্ররূপগুলি (Decay Scheme) আঁক।

29. $Th^{228}(Z=90)$ থেকে 5·338 মি-ই-ভো এবং 5·423 মি-ই-ভো শক্তি সম্পন্ন দুটি $\alpha$-রশ্মি এবং 0·0843 মি-ই-ভো শক্তি সম্পন্ন একটি $\gamma$-রশ্মি নিঃসৃত হয়। $Th^{228}$ এর সম্ভাব্য অবক্ষয় চিত্ররূপ আঁক।

30. একটি ইলেকট্রনীয় আধান এবং $M$ ($amu$) ভর সম্পন্ন ধনাত্মক আয়নকে $V$ ভোল্টে ত্বরিত করে $H$ গাউস চৌম্বক ক্ষেত্র দ্বারা বিচ্যুত করা হয়। যদি আয়নটির ভ্রমণপথের বক্রতা ব্যাসার্ধ হয় $R$ সেমি তাহলে প্রমাণ কর যে $MV=4{\cdot}826\times10^{-5}\,H^2R^2$।

যদি $V=900$ ভোল্ট ; $H=1200$ গাউস্ ও $R=22{\cdot}8$ সেমি হয়, তাহলে $M$ কত ?

31. $O^{16}$ দ্বারা নির্ধারিত পরমাণবিক ভরের এককে $C^{12}$ আইসোটোপের পরমাণবিক ভর $12{\cdot}0038065\ amu$ পাওয়া যায়। $C^{12}$ এর পরমাণবিক ভর $12{\cdot}000000$ ধরলে $O^{16}$ এর পরমাণবিক ভর কত হবে ? (15.994926)

32. $C^{12}$ দ্বারা নির্ধারিত উপরোক্ত পরমাণবিক ভরের এককে নিম্নলিখিত আইসোটোপগুলির পরমাণবিক ভর নির্ণয় কর : $n^1$, $H^1$, $H^2$, $He^4$, $P^{31}$, $Co^{59}$, $As^{75}$, $I^{127}$, $Au^{197}$, $Ra^{226}$ এবং $U^{235}$। (24) সম্পাদ্যে ও (16·1) সারণীতে প্রদত্ত রাশিমালা ব্যবহার কর।

33. উপরোক্ত $C^{12}$ এককে অ্যাভোগেড্রো সংখ্যা ও 1 $amu$-এর সমতুল ভরশক্তি মি-ই-ভো এককে নির্ণয় কর।

34. একটি বেনব্রিজের ভর বর্ণালীলেখ যন্ত্রে বেগ-নির্বাচকের মধ্যে তড়িৎক্ষেত্র $X=150$ ভোল্ট/সেমি এবং চৌম্বক ক্ষেত্র $H_1=4000$ গাউস প্রয়োগ করা হয় (16·20 সমীকরণ দ্রষ্টব্য)। এর থেকে নির্গত ইলেকট্রনীয় আধান সম্পন্ন ধনাত্মক আর্গন আয়নগুলিকে পরে $H=9000$ গাউস চৌম্বক ক্ষেত্রে বিচ্যুত করা হয়। আর্গনের $A=36$, 38 ও 40 ভর-সংখ্যা সম্পন্ন তিনটি স্থায়ী আইসোটোপ আছে। ফোটোগ্রাফিক প্লেটে এই তিনটি আইসোটোপের ভর-রেখাগুলির পারস্পরিক দূরত্ব নির্ণয় কর। বেগ-নির্বাচক থেকে নির্গত আয়নের বেগ কত হয় ? আয়নগুলির পরমাণবিক ভর ($amu$ এককে) এদের ভর-সংখ্যার সমান ধরা যেতে পারে।

(1.73 মিমি, 1·73 মিমি, $3{\cdot}75\times10^6$ সেমি/সেকেণ্ড)

35. একটি ডেম্পস্টারের ভর বর্ণালীমাপক যন্ত্রে বিভিন্ন প্রকার এক একক আধান সম্পন্ন ধনাত্মক আয়ন $V=1000$ ভোল্ট বিভব দ্বারা ত্বরিত হয়ে $R=15$ সেমি ব্যাসার্ধ সম্পন্ন অর্ধবৃত্তাকার পথে ভ্রমণ করে সংগ্রাহক প্লেটের উপর ফোকাসিত হয়। এই যন্ত্রে $O^+$, $CO^+$ এবং $CO_2^+$ আয়নগুলিকে ফোকাস করার জন্য প্রয়োজনীয় চৌম্বক ক্ষেত্রগুলির মান নির্ণয় কর।

(1214·4 গাউস্, 1606 গাউস্, 2013·8 গাউস্)

36. যদি একটি প্রোটনের আধান $e$ সমসত্ব ভাবে একটি $R$ ব্যসার্ধ সম্পন্ন গোলকের সমগ্র আয়তন ব্যাপ্ত করে থাকে, তাহলে প্রমাণ কর যে গোলকের কেন্দ্র থেকে $r$ দূরত্বে স্থির-তড়িৎ বিভব হয় $\phi=\frac{3e}{R^3}\left(\frac{R^2}{2}-\frac{r^2}{6}\right)$

37. (36) সম্পাদ্যে উল্লিখিত গোলকের মধ্যে যদি আর একটি প্রোটনের আধান একই ভাবে ব্যাপ্ত থাকে তাহলে প্রমাণ কর যে দ্বিতীয় প্রোটনটির স্থির-তাড়িত শক্তি হয় $V_{12}=6e^2/5R$।

38. (37) সম্পাদ্যের ফলাফল থেকে প্রমাণ কর যে যদি একটি $R$ ব্যাসার্ধ সম্পন্ন কেন্দ্রকের মধ্যে $Z$ সংখ্যক প্রোটন থাকে তাহলে কেন্দ্রকটির মোট কুলম্ব শক্তি হয়

$$V_c=3Z\,(Z-1)\,e^2/5R\simeq3Z^2e^2/5r_0A^{1/3}$$

উপরের সমীকরণের সাহায্যে (16·32) সমীকরণের $a_3$ ধ্রুবকের মান নির্ণয় কর। $r_0=1{\cdot}42\times10^{-13}$ সেমি ধরা যেতে পারে।

39. (16·32) সমীকরণের সাহায্যে প্রমাণ কর যে $A=$ধ্রবক হলে $Z$-এর সংগে $M$ পরিবর্তনের লেখচিত্র অধিবৃত্তাকার হয়। অধিবৃত্তের নিম্নতম বিন্দুতে $Z$ কত হয়? বিজোড় $A$

আইসোবারের ক্ষেত্রে প্রতি নির্দিষ্ট ভর-সংখ্যায় একটি অধিবৃত্ত পাওয়া যায়। জোড় $A$ আইসোবারের ক্ষেত্রে প্রতি ভর-সংখ্যায় দুটি অধিবৃত্ত পাওয়া যায়। এর কারণ কী ?

40. $B^{11}$ ও $C^{11}$, $C^{13}$ ও $N^{13}$, $N^{15}$ ও $O^{15}$ প্রভৃতি প্রত্যেক জোড়া আইসোবারীয় কেন্দ্রককে 'প্রতিবিম্ব কেন্দ্রক' (Mirror Nuclei) বলা হয়। প্রত্যেক জোড়ার বৈশিষ্ট্য হচ্ছে যে প্রথমটির $A=2Z+1$ ও দ্বিতীয়টির $A=2Z-1$ হয়, এবং দ্বিতীয়টির প্রোটন ও নিউট্রন সংখ্যা প্রথমটির ঠিক বিপরীত হয়। প্রতিবিম্ব কেন্দ্রকগুলির মধ্যে দ্বিতীয়টি সাধারণতঃ $\beta^+$ বিঘটন করে প্রথমটিতে রূপান্তরিত হয়। বেথে-ভাইস্‌জ্যাকার ভর ফর্মুলা ও (38) সম্পাদ্যের সাহায্যে প্রমাণ কর যে $\beta^+$ বিঘটন শক্তি হয়

$$Q_\beta^+=\frac{a_3(A-1)}{A^{1/3}}-(M_n-M_H)-2m_e$$

যেহেতু (16·14) সম্পাদ্য থেকে $a_3=3e^2/5r_0$ পাওয়া যায়, অতএব উপরের ফলাফল থেকে $r_0$ পাওয়া সম্ভব। উপরের উদাহরণগুলিতে $Q_\beta^+$ হয় যথাক্রমে 0·98, 1·22 ও 1·67 মি ই-ভো। $Q_\beta^+$ এবং $(A-1)/A^{1/3}$ এর লেখচিত্র অংকন করে $r_0$ নির্ণয় কর।

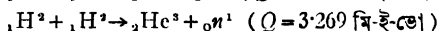
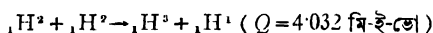
41. সাইক্লোট্রন দ্বারা ত্বরিত 7.3 মি-ই-ভো $\alpha$-কণিকার সাহায্যে $Al^{27}$ $(\alpha, p)$ $Si^{30}$ বিক্রিয়া অনুষ্ঠিত করে আপতিত $\alpha$-গুচ্ছের সাপেক্ষে $0^\circ$ কোণে নিঃসৃত প্রোটনগুলির শক্তি পাওয়া যায় 9·34 মি-ই-ভো। বিক্রিয়ার $Q$ নির্ণয় কর। (ইংগিত: 17·12 সমীকরণ ব্যবহার কর, বিভিন্ন পরমাণবিক ভরের পরিবর্তে ভর-সংখ্যা ব্যবহার কর)। (2·19 মি-ই-ভো)

42. নিম্নলিখিত কেন্দ্রক বিক্রিয়ার সমীকরণগুলিতে শূন্য স্থান পূর্ণ কর:

$He^4$ $(-, p)$ $Li^7$; $Li^7$ $(\alpha, -)$ $B^{11}$; $C^{12}$ $(p, n)$—; $F^{19}$ $(n, \gamma)$—; $Mg^{24}$ $(d,$ —$)$ $Al^{25}$; — $(\alpha, n)$ $P^{30}$; $Ni^{60}$ $(\alpha, pn)$ —; — $(p, 2n)$ $Zn^{62}$, $Rh^{103}$ $(-, \gamma)$ $Rh^{104}$; $Ag^{107}$ $(\alpha, -)$ $In^{108}$।

43. নিম্নে দুটি কেন্দ্রক বিক্রিয়া ও $Q$ সংখ্যা দেওয়া আছে:

$${}_1H^2+{}_1H^2\rightarrow{}_1H^3+{}_1H^1 \quad (Q=4\cdot032 \text{ মি-ই-ভো})$$

$${}_1H^2+{}_1H^2\rightarrow{}_2He^3+{}_0n^1 \quad (Q=3\cdot269 \text{ মি-ই-ভো})$$

$H^3$ কেন্দ্রকের ও নিউট্রনের বিঘটন নিম্নলিখিত ভাবে হয়: ${}_1H^3\rightarrow{}_2He^3+\beta^-(Q=0\cdot019$ মি-ই-ভো$)$; ${}_0n^1\rightarrow{}_1H^1+\beta^-$।

উপরে প্রদত্ত $Q$ সংখ্যাগুলির মান থেকে নিউট্রনের $\beta^-$ বিঘটন শক্তি নির্ণয় কর। (0·783 মি-ই-ভো)

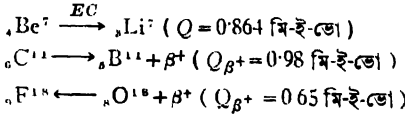
44. যদি কোন $(p, n)$ বিক্রিয়ায় সৃষ্ট মৌল $\beta^+$ বিঘটনশীল হয়, তাহলে প্রমাণ কর যে উক্ত বিক্রিয়ার ক্ষেত্রে

$$Q\,(p, n)=-(M_n-M_H-2m_e)-Q_{\beta^+}$$

অপরপক্ষে যদি এই বিক্রিয়ায় সৃষ্ট মৌল কক্ষীয় ইলেকট্রন আহরণ করে বিঘটিত হয়, তাহলে প্রমাণ কর যে

$$Q\,(p, n)=-(M_n-M_H)-Q_{EC}$$

45. $Li\ (p, n)\ Be^{7}$, $B^{11}\ (p, n)\ C^{11}$ এবং $O^{18}\ (p, n)\ F^{18}$ এই তিনটি বিক্রিয়ায় সৃষ্ট মৌলগুলির নিম্নলিখিত বিঘটন হয় :

$$_{4}Be^{7} \xrightarrow{EC} {}_{3}Li^{7} \ (Q = 0.864 \text{ মি-ই-ভো})$$
$$_{6}C^{11} \longrightarrow {}_{5}B^{11} + \beta^{+} \ (Q_{\beta^{+}} = 0.98 \text{ মি-ই-ভো})$$
$$_{9}F^{18} \longleftarrow {}_{8}O^{18} + \beta^{+} \ (Q_{\beta^{+}} = 0.65 \text{ মি-ই-ভো})$$

বিক্রিয়া তিনটির $Q$ নির্ণয় কর। এগুলি শক্তি-গ্রাহী না শক্তি-দায়ী বিক্রিয়া? শক্তি-গ্রাহী হলে এদের সূচনা শক্তি নির্ণয় কর। ( $-1.644$ ; $-2.78$, $-2.45$ মি-ই-ভো )

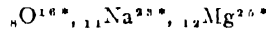
46. $(n, p)$ বিক্রিয়ায় সৃষ্ট মৌল সব সময়ে $\beta^{-}$ বিঘটনশীল হয়। প্রমাণ কর যে উক্ত বিক্রিয়ার ক্ষেত্রে $Q\ (n, p) = (M_{n} - M_{H}) - Q_{\beta^{-}}$ হয়।

47. $N^{14}(n, p)\ C^{14}$, $O^{16}\ (n,p)\ N^{16}$, $Na^{23}\ (n, p)\ Ne^{23}$ এবং $Al^{27}\ (n, p)\ Mg^{27}$ এই চারটি বিক্রিয়ার ক্ষেত্রে সৃষ্ট মৌলগুলির $\beta^{-}$ বিঘটন শক্তি হয় যথাক্রমে 0·155, 10·3, 4·21 এবং 2·64 মি-ই-ভো। বিক্রিয়া চারটির $Q$-সংখ্যা নির্ণয় কর। এগুলি শক্তি-গ্রাহী না শক্তি-দায়ী বিক্রিয়া? শক্তি-গ্রাহী হলে এদের সূচনা-শক্তি নির্ণয় কর। (0·625, $-9.52$, $-3.43$, $-1.86$ মি-ই ভো )

48. কোন এক পরীক্ষায় $O^{16}\ (d, \alpha)\ N^{14}$ বিক্রিয়া অনুষ্ঠানের জন্যে $E_{d} = 1.510$ মি-ই-ভো শক্তি সম্পন্ন ডয়টেরন ব্যবহার করা হয়। আপতিত ডয়টেরনের সাপেক্ষে 90° কোণে নিঃসৃত $\alpha$-কণিকাগুলির শক্তি পরিমাপ করে পাওয়া যায় $E_{\alpha} = 3.427$ মি-ই-ভো। বিক্রিয়ার $Q$-সংখ্যা নির্ণয় কর। ( 3 112 মি-ই-ভো )

49. (48) সম্পাদ্যে বিক্রিয়ায় অংশগ্রহণকারী কেন্দ্রক ও কণিকাগুলির ভর হয় যথাক্রমে 16·00000, 2·014736, 4·003874 এবং 14·007518 *amu*। এই রাশিমালা থেকে উপরোক্ত বিক্রিয়ার $Q$ নির্ণয় কর এবং (48) সম্পাদ্যে প্রাপ্ত $Q$-সংখ্যার সংগে তুলনা কর।

50. নিম্নলিখিত যৌগ কেন্দ্রকগুলি কী কী বিভিন্ন পদ্ধতিতে উৎপন্ন করা সম্ভব ?

$$_{8}O^{16*},\ _{11}Na^{23*},\ _{12}Mg^{26*}$$

( ইংগিত : পরিশিষ্টে প্রদত্ত স্থায়ী কেন্দ্রকগুলির তালিকা দেখ )

51 একটি সাইক্লোট্রন থেকে প্রাপ্ত 6 মি-ই-ভো শক্তি সম্পন্ন প্রোটনগুচ্ছ দ্বারা একটি 18 মিলিগ্রাম/সেমি² বেধ এবং 1 সেমি² প্রস্থচ্ছেদ সম্পন্ন তামার পাতকে 5 মিনিট ধরে উদ্‌ভাসিত করা হয়, যার ফলে $Cu^{63}\ (p, n)\ Zn^{63}$ বিক্রিয়ার দ্বারা 38 মিনিট অর্ধজীবনকাল সম্পন্ন $Zn^{63}$ উৎপন্ন হয়। যদি প্রোটন রশ্মি-প্রবাহের মান হয় 60 মাইক্রো-অ্যামপিয়ার এবং বিক্রিয়া প্রস্থচ্ছেদ হয় 0·093 বার্ন, তাহলে বিক্রিয়া অনুষ্ঠানের অব্যবহিত পরে কতগুলি $Zn^{63}$ কেন্দ্রক উৎপন্ন হবে এবং এদের বিঘটন হার কী হবে? ( $1.18 \times 10^{12}$ , $3.59 \times 10^{8}$) ( ইংগিত : সমীকরণ 17·23 ব্যবহার কর )

* * *

52. যদি একটি সাইক্লোট্রন চুম্বকের মেরুদ্বয়ের ব্যাসার্ধ 100 সেমি এবং $H = 15{,}000$ গাউস হয়, তাহলে এর দ্বারা ত্বরিত ডয়টেরন ও $\alpha$-কণিকার সর্বোচ্চ শক্তি কত হয়? প্রতি ক্ষেত্রে প্রয়োজনীয় বেতার কম্পাঙ্ক কত হয় ?

বেতার কম্পাংক অপরিবর্তিত রেখে যদি এই সাইক্লোট্রনের সাহায্যে প্রোটনগুচ্ছ ত্বরিত করতে হয়, তাহলে প্রয়োজনীয় চৌম্বক ক্ষেত্র কত হবে?

53. একটি ভ্যান্-ডে-গ্রাফ্ উৎপাদক থেকে 2 মাইক্রো-অ্যামপিয়ার $\alpha$-কণিকা প্রবাহ পাওয়া যায়। প্রতি সেকেণ্ডে কতগুলি $\alpha$-কণিকা লক্ষ্যবস্তুর উপরে আপতিত হবে? প্রাপ্ত $\alpha$-কণিকা প্রবাহ কত কুরী তেজস্ক্রিয়তার সমতুল্য?

54. একটি বীটাট্রনে সর্বোচ্চ চৌম্বক ক্ষেত্র 5000 গাওস, কম্পাংক 50 প্রতি সেকেণ্ডে ও ডো-নাট অক্ষের ব্যাসার্ধ 80 সেমি. হয়। প্রত্যেকবার আবর্তনে ইলেকট্রনগুলি গড়ে কত শক্তি অর্জন করে? সর্বোচ্চ শক্তি কত হয়? প্রাথমিক চৌম্বক ক্ষেত্র শূন্য ধরা যেতে পারে। (ইংগিত: চৌম্বক ক্ষেত্রধারা পরিবর্তনের গড় হার নির্ণয় করে গড় আবিষ্ট তড়িৎচালক বল নির্ণয় কর।)

55. প্রমাণ কর যে একটি সাইক্লোট্রনের মধ্যে কোন আয়ন $n$ সংখ্যক বার ডী-ব্যবধান পার হবার পর যে কক্ষপথে আবর্তন করে তার ব্যাসার্ধ $r \propto \sqrt{n}$ হয়।

56. কোন সাইক্লোট্রনে বেতার কম্পাংক বিভবের বিস্তার যদি $5 \times 10^4$ ভোল্ট হয় তাহলে সর্বোচ্চ শক্তি অর্জন করতে আয়নগুলিকে কতবার ডী-ব্যবধান পার হতে হয়? সাইক্লোট্রন চুম্বকের মেরুদ্বয়ের ব্যাসার্ধ 100 সেমি ও $H = 1{\cdot}2 \times 10^4$ গাওস ধরা যেতে পারে।

57. কোন সাইক্লোট্রন চুম্বকের মেরুদ্বয়ের ব্যাসার্ধ 150 সেমি ও $H = 1{\cdot}4 \times 10^4$ গাওস। এর দ্বারা ত্বরিত প্রোটন, ডয়রেটন ও $\alpha$-কণিকার আপেক্ষিকতাবাদ জনিত শতকরা ভর পরিবর্তন নির্ণয় কর।

58. একটি সিংক্রো-সাইক্লোট্রন থেকে 400 মি-ই-ভো প্রোটন পাওয়া যায়। এর বেতার কম্পাংক বিভবের কত পরিমাণ শতকরা পরিবর্তন প্রয়োজন হয়?

* * *

59. যদি প্রতিটি $U^{235}$ কেন্দ্রক বিভাজন কালে 200 মি-ই-ভো শক্তি নিঃসৃত হয়, তাহলে 1 ওয়াট ক্ষমতা উৎপন্ন করতে প্রতি সেকেণ্ডে কতগুলি বিভাজন হওয়া প্রয়োজন? 1 গ্রাম $U^{235}$ বিভজিত হলে মোট কত জুল শক্তি উৎপন্ন হয়? ($3{\cdot}13 \times 10^{10}$, $8{\cdot}2 \times 10^{10}$)

60. নিউট্রন দ্বারা $U^{235}$ বিভাজনের ফলে $A = 96$ ও 138 ভর-সংখ্যা সম্পন্ন দুটি বিভাজন-খণ্ড ও দুটি নিউট্রন উৎপন্ন হয়। বিভিন্ন কেন্দ্রক ও নিউট্রনের ভর যদি যথাক্রমে 235·1175, 95·9385, 137·9487 ও 1·00898 *amu* হয়, তাহলে কত পরিমাণ শক্তি নিঃসৃত হয়? (206 মি-ই-ভো)

61. একটি তাপীয় নিউট্রন পরমাণবিক ক্ষমতা উৎপাদন কেন্দ্রের সামর্থ্য (Capacity) হচ্ছে 60,000 কিলো-ওয়াট। যদি উৎপন্ন তাপশক্তির 20% বৈদ্যুতিক শক্তিতে রূপান্তরিত হয় এবং প্রতি বিভাজনে 200 মি-ই-ভো শক্তি উৎপন্ন হয় তাহলে বৎসরে কত পরিমাণ $U^{235}$ ব্যয়িত হয়? যদি বিক্রিয়কের মধ্যে প্রাকৃতিক ইউরেনিয়াম ব্যবহৃত হয়, তাহলে বৎসরে মোট কত পরিমাণ ইউরেনিয়াম প্রয়োজন হয়? প্রাকৃতিক ইউরেনিয়ামে $U^{235}$ এর প্রাচুর্য্য 0·7%। (115 কিলো-গ্রাম; 16·1 মেট্রিক টন)

62. একটি বিক্রিয়কের মধ্যে প্রতিটি নিউট্রন থেকে 50 পর্যায়ের পর 1068 বিভাজন-নিউট্রন সৃষ্ট হয়। বিক্রিয়কের পরিবর্ধন ধ্রুবক কত? (1·15)

63. হাইড্রোজেন গ্যাসকে কোন কোন উষ্ণতায় উত্তপ্ত করা হলে এর কণিকাগুলির গড় তাপীয় শক্তি যথাক্রমে 1 ই-ভো, 10 ই-ভো, $10^3$ ই-ভো হয় ?

$10^8$ ডিগ্রী কেল উষ্ণতায় কোন প্লাজ়্মার কণিকাগুলির গড় তাপীয় শক্তি কত হয় ?

*　　*　　*

64. পৃথিবীর চৌম্বক ক্ষেত্রে ( 0·5 গাওস ) ও সৌরমণ্ডলের চৌম্বক ক্ষেত্রে ( $10^{-5}$ গাওস ) $10^9$, $10^{12}$ ও $10^{16}$ ই-ভো শক্তি সম্পন্ন প্রোটনের ভ্রমণপথের বক্রতা ব্যাসার্ধ নির্ণয় কর।

65. সৌরমণ্ডলের ব্যাসার্ধ $1{\cdot}2\times10^{15}$ সেমি ও চৌম্বক ক্ষেত্র $10^{-5}$ গাওস হলে সৌরমণ্ডলের মধ্যে সর্বোচ্চ কত শক্তি সম্পন্ন প্রোটন আবদ্ধ থাকতে পারে ? ( $3{\cdot}6\times10^{12}$ ই-ভো )

66 অ্যান্ডারসনের পজ়িট্রন আবিষ্কার পরীক্ষায় মেঘ-কক্ষের মধ্যে রাখা সীসার প্লেট পার হবার ফলে একটি কণিকার ভরবেগ 63 মি-ই-ভো/$c$ থেকে কমে গিয়ে 22·8 মি-ই-ভো/$c$ হয়। চৌম্বক ক্ষেত্র 15000 গাওস হলে কণিকাটির ভ্রমণপথের বক্রতা ব্যাসার্ধ পরিবর্তন কত হয় ?

67. একটি স্থির $\pi$-মেসনের বিঘটনের ফলে উৎপন্ন মিউয়নের গতিশক্তি নির্ণয় কর। $\pi$ ও $\mu$ এর স্থির ভরশক্তি যথাক্রমে 140 ও 105 7 মি ই-ভো ধরা যায়।

68. একটি স্থির মিউয়নের বিঘটনের ফলে উৎপন্ন ইলেকট্রনের সর্বোচ্চ গতিশক্তি নির্ণয় কর।

69. একটি $4m_0c^2$ গতিশক্তি সম্পন্ন পজ়িট্রন একটি স্থির ইলেকট্রনের সংগে সংঘাত লাভ করে। ফলে দুটি বিনাশ জনিত $\gamma$-ফোটন পজ়িট্রনের আপতন দিকের সাপেক্ষে সমান কোণে ($\theta$) নিঃসৃত হয়। ভরবেগ ও শক্তি সংরক্ষণ সূত্র প্রয়োগ করে ফোটন দুটির শক্তি ও $\theta$ নির্ণয় কর।

# বর্ণানুক্রমিক সূচী

## ( প্রথম খণ্ড )

## ( দ্বিতীয় খণ্ড )

# শুদ্ধিপত্র

## ( প্রথম খণ্ড )

| পৃষ্ঠা | পঙ্‌ক্তি | অশুদ্ধ | শুদ্ধ |
|---|---|---|---|
| 17 | 6 | (1·5) | (1·8) |
| 18 | 5 | $n_0 e^{ax}a$ | $n_0 e^{ax}$ |
| 37 | 7 | $qy/qt$ | $dy/dt$ |
| 44 | 19 | $\eta$ | $\lambda$ |
| 153 | 28 | $j=2$ | $j-2$ |
| 156 | 16 | 1S | K |
| 160 | 18 | In | I |
| 192 | 17 | $\eta$ | $\mu$ |
| 239 | 21 | $12{\cdot}26/V$ | $12{\cdot}26/\sqrt{V}$ |
| 241 | 4 | 6·26 | 6·28 |
| 285 | 22 | S | S′ |
| 289 | 13 | এখন S′ | এখন এই ফ্রেম S |
| 289 | 14 | গতিশীল S | গতিশীল হলে S |
| 289 | 21 | (18·16*a*) এবং (18·16*d*) | (8·16*a*) এবং (8·16*d*) |
| 291 | 5 | *x*-অক্ষ | *y*-অক্ষ |

## ( দ্বিতীয় খণ্ড )

| পৃষ্ঠা | পঙ্‌ক্তি | অশুদ্ধ | শুদ্ধ |
|---|---|---|---|
| 12 | 15 | $\lambda_1 N_1 e^{\lambda_1}$ | $\lambda_1 N_1 e^{\lambda_1 t}$ |
| 43 | 4 | $2Rsl^2 \approx /4$ | $2Rs \approx l^2/4$ |
| 61 | 2 | সেমি | মি-ই-ভো |
| 73 | 15 | Scatter | Scatterer |
| 135 | 17 | $h\nu = \varepsilon_1 = \varepsilon_2$ | $h\nu = \varepsilon_1 - \varepsilon_2$ |
| 226 | 13 ও 14 | (16·9) | (16·10) |
| 402 | 19 | $mr^2\theta$ | $mr^2\dot{\theta}$ |
| 418 | 23 | Tr | Ir |
| 418 | 25 | Pf | Pt |
| 431 | 30 | 0·95 | 0·95*c* |